



Felipe Joel Zimann

**SISTEMA DE
CONTROLE
DE POTÊNCIA
ATIVA E REATIVA PARA
A REGULAÇÃO DE TENSÃO
EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE
BAIXA TENSÃO**

 **Atena**
Editora
Ano 2025



Felipe Joel Zimann

**SISTEMA DE
CONTROLE
DE POTÊNCIA
ATIVA E REATIVA PARA
A REGULAÇÃO DE TENSÃO
EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE
BAIXA TENSÃO**

 **Atena**
Editora
Ano 2025

2025 by Atena Editora

Copyright © 2025 Atena Editora

Copyright do texto © 2025, o autor

Copyright da edição © 2025, Atena Editora

Os direitos desta edição foram cedidos à Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena Editora

Editora chefe

Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira Scheffer

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Yago Raphael Massuqueto Rocha



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo desta obra, em sua forma, correção e confiabilidade, é de responsabilidade exclusiva dos autores. As opiniões e ideias aqui expressas não refletem, necessariamente, a posição da Atena Editora, que atua apenas como mediadora no processo de publicação. Dessa forma, a responsabilidade pelas informações apresentadas e pelas interpretações decorrentes de sua leitura cabe integralmente aos autores.

A Atena Editora atua com transparência, ética e responsabilidade em todas as etapas do processo editorial. Nosso objetivo é garantir a qualidade da produção e o respeito à autoria, assegurando que cada obra seja entregue ao público com cuidado e profissionalismo.

Para cumprir esse papel, adotamos práticas editoriais que visam assegurar a integridade das obras, prevenindo irregularidades e conduzindo o processo de forma justa e transparente. Nosso compromisso vai além da publicação, buscamos apoiar a difusão do conhecimento, da literatura e da cultura em suas diversas expressões, sempre preservando a autonomia intelectual dos autores e promovendo o acesso a diferentes formas de pensamento e criação.

Sistema de controle de potência ativa e reativa para a regulação de tensão em redes de distribuição de baixa tensão

| Autores:

Felipe Joel Zimann

| Revisão:

O autor

| Diagramação:

Thamires Gayde

| Capa:

Yago Raphael Massuqueto Rocha

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Z65
Autor: Felipe Joel Zimann
Sistema de controle de potência ativa e reativa para a regulação de tensão em redes de distribuição de baixa tensão / Felipe Joel Zimann. — Ponta Grossa - PR: Atena Editora, 2025.
Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-3818-2
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.182252811
1. Engenharia elétrica. 2. Redes de distribuição. 3. Controle de potência. I. Zimann, Felipe Joel. II. Título.
CDD 621.319

Atena Editora

+55 (42) 3323-5493

+55 (42) 99955-2866

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Ariadna Faria Vieira – Universidade Estadual do Piauí
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Cirênio de Almeida Barbosa – Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Cláudio José de Souza – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidade de Pernambuco
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Juliana Abonizio – Universidade Federal de Mato Grosso
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto e a implementação de um conversor cc-ca trifásico a quatro fios, com controle em corrente para regulação do valor de tensão eficaz no ponto de conexão de cargas, utilizando referência de corrente em quadratura e em fase, ou seja, energia reativa e ativa. Adicionalmente, o conversor empregado realiza a atenuação dos harmônicos de tensão pela detecção da tensão. É proposta uma estratégia de priorização da energia reativa e minimização da energia ativa. A metodologia de projeto digital é utilizada para projeto dos controladores e malhas de gerenciamento, sendo que é utilizado um processador digital de sinais para toda implementação. Os resultados das análises matemáticas são validados por simulação numérica e comprovados pela construção de um protótipo em laboratório. Os resultados obtidos mostraram que o conversor efetuou a regulação de tensão eficaz no ponto de conexão de cargas e promoveu a atenuação das harmônicas de tensão.

Palavras Chave: Conversor cc-ca, Gerenciamento de energia, Regulação da tensão eficaz, Controle digital, Atenuação de harmônicos.

ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of a four-wire, three-phase dc-ac converter with control current for the regulation of the effective voltage value at the common connection point, using in-phase and quadrature reference current, that is, reactive and active power. In addition, the converter used performs the attenuation of voltage harmonics by detecting the voltage at the common connection point. A prioritization strategy of the reactive power and minimization of the active power is proposed. The digital design methodology is used for the design of the management controllers and meshes, and a digital signal processor is used for the entire implementation. The results of the mathematical analysis are validated using numerical simulation and proven by the construction of a laboratory prototype. The results showed that the converter made the effective voltage regulation at the common connection point, and promoted the attenuation of voltage harmonics.

Keywords: Dc-ac converter, Energy management, Regulation of rms voltage, Digital control, Mitigation of harmonics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação em diagrama de blocos do sistema proposto para regulação de tensão.	4
Figura 2 - Representação em diagrama de blocos com alteração do sistema proposto para regulação de tensão.	5
Figura 3 - Circuito do sistema de distribuição de baixa tensão composto pelas impedâncias do alimentador, da linha e das cargas.	9
Figura 4 - Circuito equivalente do sistema de distribuição de baixa tensão utilizado para análise da linha.	9
Figura 5 - Potência transmitida entre fontes e a carga em função da abertura angular da linha (δ) para uma linha totalmente indutiva.	11
Figura 6 - Variação da impedância total com a variação da distância final da linha de distribuição.	12
Figura 7 - Gráficos do valor eficaz da tensão no PCC (a) e do ângulo de abertura da linha (b) em função da potência ativa transmitida.	13
Figura 8 - Gráficos do valor eficaz da tensão no PCC (a) e ângulo de abertura da linha (b) em função da potência aparente da carga e seu fator de potência ($ Z_g = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$; $V_g = 1,000$ pu).	14
Figura 9 - Circuito equivalente do sistema de distribuição de energia elétrica com conversor e cargas conectadas ao PCC.	15
Figura 10 - Gráficos do valor eficaz da tensão no PCC (a) e potência reativa do conversor (b) em função da potência aparente da carga e seu fator de potência para limite mínimo adequado de tensão. ($V_{min} = 0,9136$ pu; $ Z_g = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$; $V_g = 1,000$ pu).	17
Figura 11 - Gráficos do valor eficaz da tensão no PCC (a) e da potência ativa do conversor (b) em função da potência aparente da carga e seu fator de potência para limite mínimo adequado de tensão. ($V_{min} = 0,9136$ pu; $ Z_g = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$; $V_g = 1,000$ pu).	18
Figura 12 - Fluxograma das malhas de energia com priorização da energia reativa em relação a energia ativa para regulação do valor eficaz da tensão.	20

LISTA DE FIGURAS

Figura 13 - Gráficos de exemplificação de casos possíveis para a malha de gerenciamento de energia ativa e reativa.....	21
Figura 14 - Gráficos: a) Valor da tensão eficaz no PCC, b) Potência ativa (P_{inv}), c) Potência reativa (Q_{inv}), d) Potência aparente (S_{inv}) injetadas para limite mínimo adequado de tensão eficaz e e) Ângulo de abertura da linha (δ) ($V_{min} = 0,9136$ pu; $ Z_g = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$).....	22
Figura 15 - Gráficos: a) Valor da tensão eficaz no PCC, b) Potência ativa (P_{inv}), c) Potência reativa (Q_{inv}), d) Potência aparente (S_{inv}) injetadas para referência de tensão eficaz intermediária e e) Ângulo de abertura da linha (δ) ($V_{min} = 0,9500$ pu; $ Z_g = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$).....	23
Figura 16 - Gráficos: a) Valor da tensão eficaz no PCC, b) Potência ativa (P_{inv}), c) Potência reativa (Q_{inv}), d) Potência aparente (S_{inv}) injetadas para limite de tensão eficaz próximo ao unitário e e) Ângulo de abertura da linha (δ) ($V_{min} = 1,0000$ pu; $ Z_g = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$).....	24
Figura 17 - Diagrama geral das malhas de controle do conversor.	27
Figura 18 - Estrutura de potência do conversor cc-ca com filtro LCL de saída.	28
Figura 19 - Circuito equivalente monofásico do inversor, filtro terceira ordem e tensão da rede para obtenção dos modelos de transferência.	29
Figura 20 - Tensão aplicada no ponto “A” no intervalo de comutação.....	30
Figura 21 - Circuito equivalente monofásico do conversor, filtro LCL e tensão no PCC para obtenção das funções de transferência.	31
Figura 22 - Circuito equivalente monofásico do inversor, filtro, cargas e rede para obtenção do modelo de tensão no PCC em função da corrente de saída do conversor.	33
Figura 23 - Circuito equivalente para modelo de tensão total do barramento.....	34
Figura 24 - Circuito equivalente para modelo de tensão diferencial do barramento.....	35
Figura 25 - Diagrama de potência e variáveis de controle do conversor.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 26 - Diagrama de blocos das malhas de controle do conversor.	38
Figura 27 - Capacitores de barramento com resistência de equalização.....	42
Figura 28 - Curva da variação do produto $L_f C_f$ em função do parâmetro de relação de indutâncias (r_p).	44
Figura 29 - Curva da variação da atenuação, na frequência de comutação, do filtro em função do parâmetro de relação de indutâncias (r_p).	45
Figura 30 - Curva da variação da energia armazenada no filtro em função do parâmetro de relação de capacitância por indutância total (r_q).	46
Figura 31 - Módulos de IGBTs utilizados no protótipo (SKM75GB063D).....	48
Figura 32 - Comutação complementar digital com sincronização e atualização no pico da portadora.	51
Figura 33 - Circuito de sincronismo q -PLL com condição inicial.	52
Figura 34 - Circuito simplificado de sincronismo q -PLL com condição inicial.	53
Figura 35 - Gráficos de magnitude e fase do diagrama de bode para o controlador do circuito de sincronismo.	53
Figura 36 - Representação em diagrama de blocos da malha de amortecimento.	55
Figura 37 - Gráficos de magnitude e fase do diagrama de bode do controlador <i>lead-lag</i> e de um diferenciador ideal.	57
Figura 38 - Diagrama de bode do controlador de amortecimento malha fechada com a planta de corrente, a planta de corrente e o controlador.	57
Figura 39 - Representação em diagrama de blocos da malha de controle de corrente com a malha interna de amortecimento ativo.	58
Figura 40 - Diagramas de bode do controlador de corrente com a planta de corrente, a planta de corrente com amortecimento e o controlador de corrente.	59
Figura 41 - Representação em diagrama de blocos da malha de controle da tensão eficaz no PCC para referência em fase e quadratura.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 42 - Diagramas de bode do controlador de tensão eficaz no PCC, planta de tensão eficaz no PCC e planta mais controlador.....	61
Figura 43 - Representação em diagrama de blocos da malha de controle da tensão total de barramento.....	61
Figura 44 - Diagramas de bode do controlador de tensão total de barramento, planta de tensão total de barramento e planta mais controlador.	62
Figura 45 - Representação em diagrama de blocos da malha de controle da tensão diferencial de barramento.	63
Figura 46 - Diagramas de bode do controlador de tensão diferencial de barramento, planta de tensão diferencial de barramento e planta mais controlador.	63
Figura 47 - Representação em diagrama de blocos da malha de controle das harmônicas de tensão no PCC.....	64
Figura 48 - Diagramas de bode do controlador de harmônicas, planta de tensão no PCC e planta mais controlador.....	66
Figura 49 - Cargas resistivas, indutivas e não lineares utilizadas na validação do sistema por simulação numérica.	68
Figura 50 - Circuito de simulação numérica do sistema composto pela rede elétrica e circuito de potência.....	69
Figura 51 - Circuito de simulação numérica do sistema composto pelo bloco de controle em C, que representa o DSC e modulador PWM.....	70
Figura 52 - Circuito de simulação numérica do sistema composto pelas cargas lineares e não lineares.....	71
Figura 53 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC sem compensação para carga leve.	72
Figura 54 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC com compensação para carga leve.	72
Figura 55 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor e tensões individuais e tensão total de barramento para carga leve.	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 56 - Referências das correntes em quadratura e em fase e valor eficaz da tensão no PCC durante o início da compensação para carga leve.	74
Figura 57 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC sem compensação para carga pesada.	75
Figura 58 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC com compensação para carga pesada.	76
Figura 59 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor e tensões individuais e tensão total de barramento para carga pesada.	76
Figura 60 - Referências das correntes em quadratura e em fase e valor eficaz da tensão no PCC durante o início da compensação para carga pesada.	77
Figura 61 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC sem compensação para carga desequilibrada.	78
Figura 62 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC com compensação para carga desequilibrada.	79
Figura 63 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor e tensões individuais e tensão total de barramento para carga desequilibrada.	80
Figura 64 - Referências das correntes em quadratura e em fase e valor eficaz da tensão no PCC durante o início da compensação para carga desequilibrada.	80
Figura 65 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC sem compensação para carga linear desequilibrada com rede distorcida.	82
Figura 66 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC com compensação para carga linear desequilibrada com rede distorcida.	83
Figura 67 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor e tensões individuais e tensão total de barramento para rede distorcida.	83
Figura 68 - Conteúdo harmônico das tensões no PCC com rede distorcida e com carga linear desequilibrada sem compensação e com compensação.	84
Figura 69 - Referências das correntes em quadratura e em fase e valor eficaz da tensão no PCC durante o início da compensação para rede distorcida e com carga linear desequilibrada.	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 70 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC sem compensação para carga não linear e carga equilibrada.....	86
Figura 71 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC com compensação para carga não linear e carga equilibrada.....	86
Figura 72 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor e tensões individuais e tensão total de barramento para carga não linear.....	87
Figura 73 - Referências das correntes em quadratura e em fase e valor eficaz da tensão no PCC durante o a compensação para carga não linear.....	87
Figura 74 - Conteúdo harmônico das tensões no PCC sem e com compensação para carga não linear.	88
Figura 75 - Referências das correntes em quadratura e em fase, o valor eficaz da tensão no PCC e a tensão total de barramento durante o degrau de carga leve para pesada.....	90
Figura 76 - Referências das correntes em quadratura e em fase, o valor eficaz da tensão no PCC e a tensão total de barramento durante o degrau de carga pesada para leve.....	91
Figura 77 - Montagem experimental do protótipo conectado as cargas, a rede elétrica com impedância de rede e autotransformador.....	94
Figura 78 - Foto do protótipo implementado.	95
Figura 79 - Imagem da <i>daughter board</i> do DSC utilizado.....	97
Figura 80 - Fluxograma da lógica de funcionamento implementada no DSC.	98
Figura 81 - Imagem do analisador de energia modelo PA4000.....	99
Figura 82 - Formas de onda experimentais da tensão no PCC sem compensação para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.	100
Figura 83 - Formas de onda experimentais da tensão no PCC com compensação para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.	101
Figura 84 - Formas de onda experimentais das correntes injetadas pelo conversor para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 85 - Conteúdo harmônico experimental das tensões no PCC sem e com compensação para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.	102
Figura 86 - Conteúdo harmônico experimental das correntes injetadas pelo conversor para carga linear com restrição de energia ativa.	103
Figura 87 - Gráficos experimentais das potências ativa, reativa e aparente para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.	103
Figura 88 - Formas de onda experimentais da tensão no PCC sem compensação para carga linear equilibrada sem restrição de energia ativa.....	105
Figura 89 - Formas de onda experimentais da tensão no PCC com compensação para carga linear equilibrada sem restrição de energia ativa.....	105
Figura 90 - Formas de onda experimentais das correntes injetadas pelo conversor para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.....	106
Figura 91 - Conteúdo harmônico experimental das tensões no PCC sem e com compensação para carga equilibrada sem restrição de energia ativa.	106
Figura 92 - Conteúdo harmônico experimental das correntes injetadas pelo conversor para carga linear sem restrição de energia ativa.....	107
Figura 93 - Gráficos experimentais das potências ativa, reativa e aparente para carga linear equilibrada sem restrição de energia ativa.....	107
Figura 94 - Formas de onda experimentais das tensões no PCC sem compensação para carga linear desequilibrada sem restrição de energia ativa.	109
Figura 95 - Formas de onda experimentais das tensões no PCC com compensação para carga linear desequilibrada sem restrição de energia ativa.	109
Figura 96 - Formas de onda experimentais das correntes injetadas pelo conversor para carga linear desequilibrada com restrição de energia ativa. 10	
Figura 97 - Conteúdo harmônico experimental das tensões no PCC sem e com compensação para carga desequilibrada sem restrição de energia ativa. .110	

LISTA DE FIGURAS

Figura 98 - Conteúdo harmônico experimental das correntes injetadas pelo conversor para carga desequilibrada sem restrição de energia ativa.	111
Figura 99 - Gráficos experimentais das potências ativa, reativa e aparente para carga linear desequilibrada sem restrição de energia ativa.	111
Figura 100 - Formas de onda experimentais das tensões no PCC sem compensação para carga não linear equilibrada sem restrição de energia ativa.	113
Figura 101 - Formas de onda experimentais das tensões no PCC com compensação para carga não linear equilibrada sem restrição de energia ativa.	113
Figura 102 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor para carga não linear equilibrada com restrição de energia ativa.	114
Figura 103 - Conteúdo harmônico experimental das correntes injetadas pelo conversor para carga linear sem restrição de energia ativa.	114
Figura 104 - Conteúdo harmônico experimental das tensões no PCC sem e com compensação para carga não linear sem restrição de energia ativa. .	115
Figura 105 - Formas de onda experimentais das tensões no barramento regulado.	116
Figura 106 - Gráficos experimentais das potências ativa, reativa e aparente para degrau carga leve para pesada sem restrição de energia ativa.	117
Figura 107 - Gráficos experimentais das potências ativa, reativa e aparente para degrau carga pesada para leve sem restrição de energia ativa.	118
Figura 108 - Circuito equivalente do tipo T para o transformador de dois enrolamentos.	128
Figura 109 - Circuito equivalente simplificado referido para o lado secundário.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da tensão de atendimento no ponto de conexão de cargas para tensão nominal de 220/127 V.....	2
Tabela 2 - Níveis de referência para distorção harmônica individual de tensão em porcentagem da fundamental.	3
Tabela 3 - Parâmetros de impedância de linha obtidos para distância de 400 m.....	13
Tabela 4 - Principais características de potência do conversor.....	40
Tabela 5 - Parâmetros do capacitor de barramento (B43586).....	41
Tabela 6 - Parâmetros teóricos e experimentais do filtro de saída.	47
Tabela 7 - Parâmetros dos IGBTs.	47
Tabela 8 - Parâmetros dos diodos.....	48
Tabela 9 - Parâmetros de controle da malha de amortecimento ativo.....	56
Tabela 10 - Parâmetros de controle da malha de controle de corrente.....	59
Tabela 11 - Impedância equivalente para harmônicas da frequência fundamental e parâmetro de ajuste do controle.	65
Tabela 12 - Ângulos da malha de controle de harmônicas da tensão em cada harmônica.	66
Tabela 13 - Parâmetros de tensão e corrente do sistema com carga leve....	74
Tabela 14 - Parâmetros de tensão e corrente do sistema com carga pesada.....	77
Tabela 15 - Parâmetros de tensão e corrente do sistema com carga desequilibrada.....	81
Tabela 16 - Parâmetros de tensão e corrente do sistema com distorção da rede e com carga linear desequilibrada.....	85
Tabela 17 - Parâmetros de tensão e corrente do sistema com carga não linear equilibrada.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 18 - Parâmetros de impedância de linha para a simulação e experimental.	96
Tabela 19 - Parâmetros experimentais de tensão e corrente do sistema com carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.	104
Tabela 20 - Parâmetros experimentais de tensão e corrente do sistema com carga linear equilibrada sem restrição de energia ativa.	108
Tabela 21 - Parâmetros experimentais de tensão e corrente do sistema com carga linear desequilibrada sem restrição de energia ativa.	112
Tabela 22 - Parâmetros experimentais de tensão e corrente do sistema com carga não linear equilibrada sem restrição de energia ativa.	115
Tabela 23 - Dados do transformador	129

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 LEGISLAÇÃO.....	1
1.2 PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA.....	3
1.3 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	5
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	6
 2 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA.....	 8
2.1 QUEDA DE TENSÃO NAS LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO	8
2.1 CONEXÃO DO CONVERSOR NO PCC	14
2.2 ESTRATÉGIAS DE COMPENSAÇÃO	16
2.2.1 Compensação por energia reativa	17
2.2.2 Compensação por energia ativa	18
2.2.3 Compensação por energia ativa e reativa	19
2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	25
 3 MODELAGEM DO CONVERSOR	 26
3.1 ESTRUTURA DE POTÊNCIA.....	28
3.2 MODELOS MATEMÁTICOS.....	28
3.2.1 Modelo da Corrente de Saída	29
3.2.2 Modelo da Tensão Eficaz no PCC	33
3.2.3 Modelo da Tensão Total de Barramento	34
3.2.4 Modelo da Tensão Diferencial de Barramento	35
3.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE	36
3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	39

SUMÁRIO

4 PROJETO DO CONVERSOR	40
4.1 Determinação dos Capacitores de Barramento.....	40
4.2 Determinação do Filtro de Saída.....	42
4.3 Determinação dos Interruptores.....	47
4.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	48
5 CONTROLE DIGITAL	50
5.1 MODULADOR PWM.....	50
5.2 CIRCUITO DE SINCRONISMO	52
5.3 PROJETO DOS CONTROLADORES.....	54
5.3.1 Controlador de Amortecimento Ativo	54
5.3.2 Controlador da Corrente de Saída.....	58
5.3.3 Controlador do Valor Eficaz da Tensão no PCC.....	60
5.3.4 Controlador de Tensão Total de Barramento.....	61
5.3.5 Controlador de Tensão Diferencial de Barramento.....	62
5.3.6 Controlador de Harmônicas.....	64
5.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	67
6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	68
6.1 DEFINIÇÃO DAS CARGAS	68
6.2 CIRCUITO DE SIMULAÇÃO.....	69
6.3 CARGA LINEAR EQUILIBRADA	71
6.3.1 Carga Leve	71
6.3.2 Carga Pesada	75
6.4 CARGA LINEAR DESEQUILIBRADA.....	78
6.5 REDE DISTORCIDA	81
6.6 CARGA NÃO LINEAR	85

SUMÁRIO

SUMÁRIO

6.7 DINÂMICA DE CARGA.....	89
6.7.1 Carga Leve para Carga Pesada.....	89
6.7.2 Carga Pesada para Carga Leve.....	90
6.8 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	92
7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	93
7.1 CIRCUITO EXPERIMENTAL.....	93
7.2 CONTROLADOR DIGITAL DE SINAIS	96
7.3 RESULTADOS OBTIDOS.....	99
7.3.1 Carga Linear Equilibrada	99
7.3.1.1 Com Restrição de Energia Ativa	100
7.3.1.2 Sem Restrição de Energia Ativa.....	104
7.3.2 Carga Linear Desequilibrada Sem Restrição de Energia Ativa.....	108
7.3.3 Carga Não Linear Sem Restrição de Energia Ativa.....	112
7.3.4 Tensões de Barramento	116
7.3.5 Degrau de Carga Sem Restrição de Energia Ativa.....	117
7.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	118
8 CONCLUSÃO GERAL	120
REFERÊNCIAS	123
APÊNDICE A - PARÂMETROS DE LINHA.....	128



1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a qualidade de energia elétrica sempre foi um tema abordado na literatura e o constante crescimento econômico e tecnológico motivam pesquisas relacionadas ao fornecimento de energia elétrica e mecanismos de controle da qualidade do serviço prestado aos consumidores. A disseminação da eletrônica de potência aliada ao crescimento da quantidade de equipamentos eletrônicos nas residências e indústrias trouxe avanço tecnológico e conforto para os usuários. Entretanto, também originou algumas reações indesejadas na rede elétrica, como aquelas provocadas por componentes que operam de forma não linear. O desenvolvimento econômico também possibilitou a aquisição de uma maior quantidade de equipamentos mais potentes e com mais funcionalidades, que implicam um maior consumo de energia.

Se por um lado a eletrônica de potência é responsável pelo aumento do consumo de energia, também é responsável por tecnologias que permitem a correção dos problemas causados (YU *et al.*, 2011). Nesse contexto são encontrados os conversores cc-ca como alternativa para o problema da regulação da tensão eficaz, além de poder adotar algumas funcionalidades dos filtros ativos (LI; HE, 2014). São especialmente adotados como soluções temporárias diante de casos como melhorias da infraestrutura de fornecimento de energia elétrica, visando principalmente evitar possíveis multas das companhias distribuidoras frente a problemas da qualidade de energia fornecida (KANIEWSKI *et al.*, 2015).

1.1 LEGISLAÇÃO

O Brasil possui uma agência reguladora com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica, chamada Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Como a qualidade de energia elétrica é considerada uma preocupação constante no sistema de distribuição de energia elétrica, foram criados os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), que visam normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho do sistema de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2014).

Dentre os principais objetivos do PRODIST destaca-se a qualidade do fornecimento de energia elétrica, que é abordado pelo Módulo 8 (ANEEL, 2014). Neste módulo são estabelecidos os valores de referência e procedimentos relativos a qualidade do produto. Os aspectos considerados da qualidade do produto em regime permanente ou transitório são:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Harmônicos;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Variação de frequência.

A tensão em regime permanente é classificada de acordo com os valores limites adequados, precários e críticos. A distribuidora precisa manter a tensão em regime permanente dentro dos padrões adequados de fornecimento, para que não esteja passível de ressarcimento aos consumidores afetados.

A Tabela 1 apresenta a classificação das faixas de variação da tensão de fornecimento para sistemas atendidos em (220/127) V

Tabela 1 - Classificação da tensão de atendimento no ponto de conexão de cargas para tensão nominal de 220/127 V.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura [V]
Adequada	$116 \leq TL \leq 133$
Precária	$109 \leq TL < 116$ ou $133 < TL \leq 140$
Crítica	$TL < 109$ ou $TL > 140$

Fonte: Baseado em (ANEEL, 2014).

Estando em desconformidade com o fornecimento da tensão, a distribuidora deve ressarcir os consumidores afetados até a regularização do problema, conforme dados coletados, armazenados e analisados pela concessionária.

A Tabela 2 apresenta os níveis individuais de distorção harmônica para a tensão de fornecimento, que deve permanecer dentro dos limites estipulados pela norma para a classe de tensão menor que 1 kV.

Tabela 2 - Níveis de referência para distorção harmônica individual de tensão em porcentagem da fundamental.

Ordem Harmônica $V_n \leq 1 \text{ kV}$	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]	
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5
	7	6,5
	11	4,5
	13	4
	17	2,5
	19	2
	23	2
	25	2
	> 25	1,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5
	9	2
	15	1
	21	1
	> 21	1
Pares	2	2,5
	4	1,5
	6	1
	8	1
	10	1
	12	1
	> 12	1

Fonte: Baseado em (ANEEL, 2014).

1.2 PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA

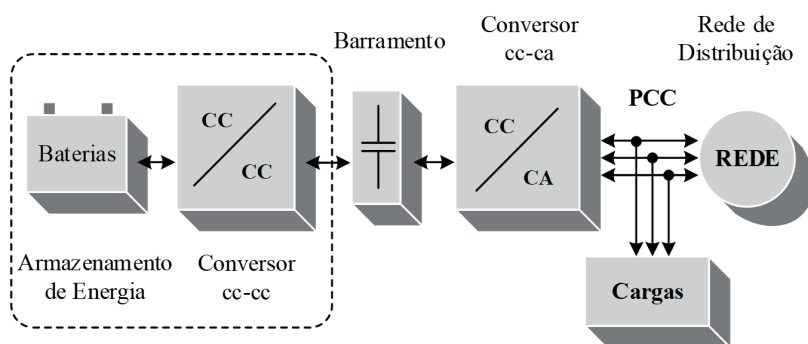
Diante dos problemas de regulação de tensão eficaz no ponto de conexão de cargas (PCC) é proposto um dispositivo que seja capaz de efetuar a regulação do valor eficaz de tensão e adicionar funcionalidades de filtros ativos como atenuação de harmônicos de tensão.

Na Figura 1 é apresentada a proposta inicial para o sistema de compensação. Este sistema é composto pelo armazenamento de energia em baterias, um conversor cc-cc, barramento cc, conversor cc-ca e as cargas conectadas à rede elétrica. As baterias são utilizadas para armazenar energia durante momentos em que o conversor não esteja

regulando a rede, como por exemplo, no período noturno. Essa energia armazenada permanece disponível para ser utilizada pelo sistema de gerenciamento e controle. O conversor cc-cc promove a adequação dos valores de tensão entre a bateria e o barramento cc. Como é preciso carregar e descarregar as baterias o conversor cc-cc também efetua o controle de corrente que flui entre esses dispositivos.

O conversor cc-ca é responsável pela sintetização das correntes de saída, que podem estar em fase ou em quadratura com a tensão da rede. Para se alcançar formas de onda senoidais são utilizadas técnicas de modulação por largura de pulso e filtros de saída para atenuação de componentes em alta frequência.

Figura 1 - Representação em diagrama de blocos do sistema proposto para regulação de tensão.



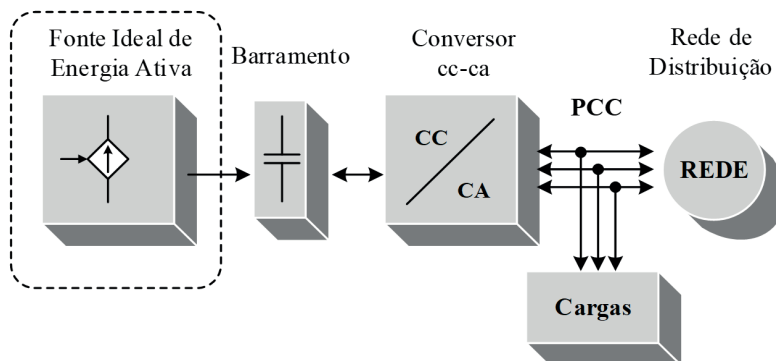
Fonte: Produção do próprio autor.

Para maximizar a carga das baterias é necessária uma estratégia que possa fazer menor uso de energia ativa, priorizando a energia reativa na regulação de tensão. Esta é uma forma de prolongar a vida útil de um banco de baterias, que ao longo prazo pode trazer redução dos custos de manutenção e ainda contribuir para diminuição do impacto ambiental (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013).

A estratégia de gerenciamento de energia é completamente oposta quando comparado a sistemas que utilizam fontes renováveis de energia, como a fotovoltaica. Na maior parte desses sistemas deseja-se extrair o máximo de potência dos módulos fotovoltaicos e injetar energia ativa na rede elétrica (KOURO *et al.*, 2015).

Neste trabalho as baterias e o conversor cc-cc foram substituídos por uma fonte ideal de corrente, que fornece energia para o barramento. Como o objetivo é desenvolver as estratégias de gerenciamento de energia, as análises recaem sobre o controle e o conversor cc-ca. Essa alteração na solução proposta é mostrada na Figura 2.

Figura 2 - Representação em diagrama de blocos com alteração do sistema proposto para regulação de tensão.



Fonte: Produção do próprio autor.

1.3 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um conversor cc-ca capaz de compensar a tensão eficaz no ponto de conexão de cargas, utilizando energia ativa e reativa, priorizando a energia reativa na regulação. Ainda, apresentar uma técnica capaz de gerar referências de correntes harmônicas estimadas da própria tensão para atenuar o conteúdo harmônico da tensão.

São consideradas as principais contribuições deste trabalho:

- Definição de uma estratégia que prioriza o uso de energia reativa, utilizando referência de corrente em quadratura e em fase, frente a energia ativa para regulação do valor eficaz da tensão em rede de distribuição de baixa tensão.
- Definição de uma estratégia de atenuação de harmônicos de tensão estimados a partir da própria tensão e injetadas em forma de corrente, dentro dos limitantes da estrutura proposta.
- Controle da corrente de saída do filtro LCL de terceira ordem com atenuação da frequência de ressonância utilizando uma técnica de amortecimento ativa.
- Implementação de um conversor cc-ca capaz de injetar corrente em quadratura ou em fase conectado à rede elétrica através de um filtro LCL utilizando controle digital.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é dividido nos seguintes capítulos:

No capítulo 2 são apresentadas as análises do fluxo de potência com base no modelo elétrico apresentado composto pelas impedâncias dos alimentadores e das linhas de distribuição. A impedância da rede ocasiona uma diminuição do valor eficaz de tensão para os consumidores. São apresentados os equacionamentos e os gráficos resultantes das análises. A compensação por energia reativa e ativa é estudada e a estratégia de regulação é apresentada.

No capítulo 3 são apresentados os modelos matemáticos resultantes do conversor escolhido. As funções de transferências necessárias para o controle são em função da corrente de saída, da tensão no capacitor do filtro para amortecimento ativo, da tensão eficaz no PCC para regulação, das tensões de barramento, do modulador *Pulse Width Modulation (PWM)* e das referências sincronizadas com a rede. Ao final do capítulo são apresentados os diagramas de potência, que contemplam uma visão geral do conversor e suas variáveis e do diagrama de controle que resume o funcionamento e a relação entre as malhas de controle.

No capítulo 4 é apresentado o projeto do conversor com especificação de potência, número de fases e fios, frequência da rede e de comutação. A capacitância e o valor da tensão de barramento são selecionados para um funcionamento adequado. São apresentados os cálculos do filtro LCL, com o procedimento matemático descrito aliado às análises gráficas das equações. Por fim são apresentados os módulos de potência dos interruptores utilizados no conversor.

No capítulo 5 é apresentado o projeto dos controladores digitais utilizando os modelos matemáticos obtidos nos capítulos anteriores. O funcionamento do modulador digital é apresentado juntamente com os efeitos decorrentes da utilização do mesmo, assim como o circuito de sincronismo utilizado e projeto do controlador. A malha de amortecimento ativo é baseada na tensão do capacitor do filtro e um controlador *lead-lag* para gerar uma ação de controle, que subtraída da ação de controle do controlador de corrente, mantém o sistema estável. Os controladores ressonantes na malha de controle de corrente foram fixados na frequência fundamental, 3ª, 5ª, 7ª e 9ª para rastreamento com menor erro possível das frequências de interesse. A malha de harmônicas utiliza a tensão para estimar as harmônicas necessárias para compensação. As demais malhas do valor eficaz de tensão no PCC, tensão total e diferencial de barramento utilizam estruturas do tipo PI, uma vez que são suficientes para atingir os requisitos necessários.

No capítulo 6 são apresentados os resultados de simulação do conversor e das malhas de controle. São estipuladas as cargas necessárias para se realizar a validação do projeto. A queda de tensão pode ser maior ou menor dependendo das potências solicitadas pela carga, sendo testadas as malhas de gerenciamento de energia ativa e reativa. Distorções harmônicas na tensão são inseridas pela rede ou por cargas para comprovar o funcionamento da malha de harmônicas.

No capítulo 7 são apresentados os resultados experimentais do conversor e das malhas de controle. É apresentado o protótipo implementado em laboratório juntamente com o *Digital Signal Controller (DSC)* utilizado para execução do código de comando e controle. São apresentadas as formas de onda de tensão no PCC e corrente do conversor, os valores eficazes e os valores da *Total Harmonic Distortion (THDs)*. As análises harmônicas de cada sinal também são apresentadas e comparadas após a compensação. São medidas as potências ativa, reativa e aparente em cada teste para validação das estratégias e malhas de controle.

O capítulo 8 encerra o trabalho com as conclusões e considerações do projeto. São sugeridos tópicos de pesquisa com os assuntos relacionados a este trabalho para continuação do desenvolvimento tecnológico da área.



2 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA

Neste capítulo são estudadas as linhas de distribuição de baixa tensão e os efeitos que levam a queda de tensão no PCC. São obtidos os modelos equivalentes para o sistema, mostrando a interpretação física dos resultados obtidos pelo equacionamento do arranjo e ainda destacando os limites considerados neste estudo. A comparação dos valores de referência com os limites estabelecidos pelas normas aplicadas é mostrada destacando a importância do tema.

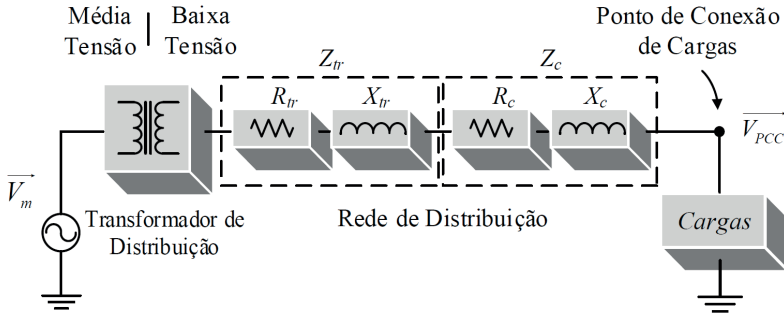
As técnicas de compensação com energia reativa e ativa são mostradas e equacionadas com seus resultados discutidos, além de apresentar o diagrama de compensação, que mostra a lógica de priorização de energia das malhas que compõem o controle.

2.1 QUEDA DE TENSÃO NAS LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

Os ramos do sistema de distribuição são compostos por transformadores de potência, cabos de diferentes comprimentos e cargas para cada trecho do sistema. Ao longo das linhas de distribuição ocorre a diminuição no valor eficaz da tensão fornecida, principalmente no trecho final de longas linhas. Esse efeito está relacionado aos parâmetros resistivos e indutivos inerentes ao sistema de distribuição.

A Figura 3 mostra o modelo utilizado para representar a linha de distribuição em estudo, que é formado pelo transformador abaixador e suas impedâncias, pelas impedâncias distribuídas da linha, pelo ponto de conexão de cargas e pelas cargas.

Figura 3 - Circuito do sistema de distribuição de baixa tensão composto pelas impedâncias do alimentador, da linha e das cargas.



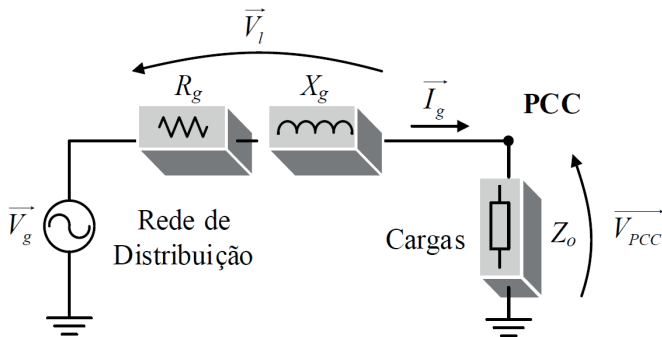
Fonte: Produção do próprio autor.

A impedância do transformador (Z_{tr}) é composta por uma parcela resistiva e indutiva ($R_{tr} + j \cdot X_{tr}$) e a impedância dos cabos de distribuição (Z_c) também é composta por uma parcela resistiva e indutiva ($R_c + j \cdot X_c$). Como a impedância dos cabos é dependente do comprimento, quanto mais distante do transformador maior a impedância total até o PCC. Esse arranjo compõe a impedância total da linha ($Z_g = R_g + j \cdot X_g$) e é mostrado na eq. (1):

$$Z_g = Z_{tr} + Z_c = (R_{tr} + j \cdot X_{tr}) + (R_c + j \cdot X_c) = (R_g + j \cdot X_g) \quad (1)$$

A partir do circuito equivalente mostrado na Figura 4 obtêm-se as equações para as análises necessárias sobre a queda do valor eficaz da tensão no PCC. Considera-se que a fonte \vec{V}_g é ideal, puramente senoidal e livre de distorções harmônicas.

Figura 4 - Circuito equivalente do sistema de distribuição de baixa tensão utilizado para análise da linha.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 4 V_g é a tensão do alimentador, V_l é a tensão sobre a impedância da linha, V_{PCC} é a tensão no ponto de conexão de cargas, Z_o é a impedância de carga e I_g é a corrente que é fornecida pelo alimentador. Pode-se então escrever:

$$\vec{V}_g = \vec{V}_{PCC} + \vec{V}_l = \vec{V}_{PCC} + Z_g \cdot \vec{I}_g. \quad (2)$$

Multiplicando os dois lados da equação pelo complexo-conjugado de V_{PCC} , tem-se:

$$\left[\vec{V}_g = \vec{V}_{PCC} + Z_g \cdot \left(\frac{S_o}{V_{PCC}} \right)^* \right] \cdot \vec{V}_{PCC}^*, \quad (3)$$

$$\vec{V}_g \vec{V}_{PCC}^* = V_{PCC}^2 + Z_g S_o^*. \quad (4)$$

Agora transformando a equação representada por fasores na forma polar para forma retangular e considerando que $V_g = V_g < 0^\circ$ e $V_{PCC} = V_{PCC} < -0^\circ$, obtém-se:

$$V_g V_{PCC} [\cos(-\theta) + j \sin(-\theta)] = V_{PCC}^2 + (R_g + jX_g) + (P_o - jQ_o). \quad (5)$$

Então separando as partes reais e imaginárias e aplicando algumas propriedades trigonométricas das funções seno e cosseno:

$$\begin{cases} V_g V_{PCC} \cdot \cos(\theta) = V_{PCC}^2 + R_g P_o + X_g Q_o \\ V_g V_{PCC} \cdot \sin(\theta) = R_g Q_o - X_g P_o \end{cases} \quad (6)$$

Elevando ao quadrado ambos os lados das equações e somando chega-se a uma equação que representa a tensão no PCC em função das potências que são consumidas pela carga e pela impedância total da linha, conforme eq. (7):

$$V_{PCC}^4 + V_{PCC}^2 \cdot [2 \cdot A - V_g^2] + [B^2 + A^2] = 0 \quad \begin{cases} A = R_g P_o + X_g Q_o \\ B = R_g Q_o - X_g P_o \end{cases} \quad (7)$$

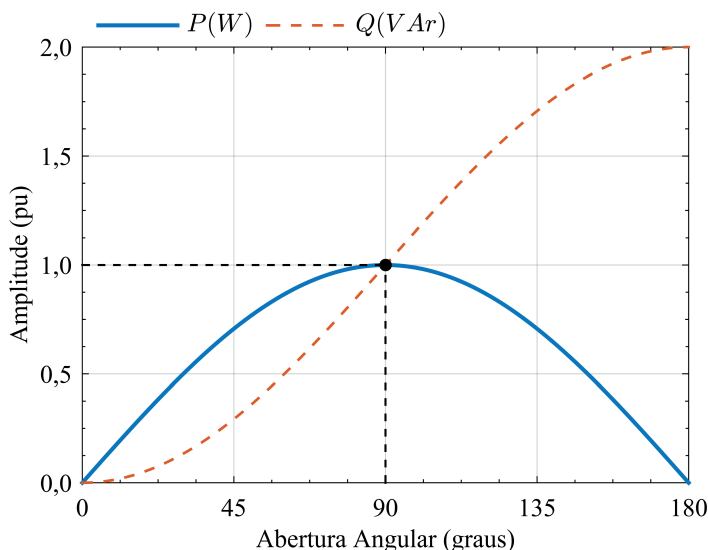
onde V_{PCC} é o módulo da tensão eficaz no PCC, V_g é o módulo tensão na fonte, R_g e X_g são as impedâncias da linha e P_o e Q_o são as potências fornecidas à carga.

A diferença entre os ângulos da tensão da rede e da tensão no PCC é análoga à transmissão de potência entre duas fontes de tensão separadas por uma impedância (VANDOORN *et al.*, 2013). Sendo assim, define-se o ângulo de abertura da linha, que pode ser obtido através da eq. (8):

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{B}{V_g V_{PCC}} \right). \quad (8)$$

A capacidade de transmissão de potência ativa e reativa de uma linha de distribuição possui dependência direta do ângulo de abertura que é a diferença entre os ângulos das tensões entre as tensões da linha de transmissão. Na Figura 5 é apresentado a característica de transmissão para uma rede sem a parcela resistiva da impedância da linha.

Figura 5 - Potência transmitida entre fontes e a carga em função da abertura angular da linha (δ) para uma linha totalmente indutiva.



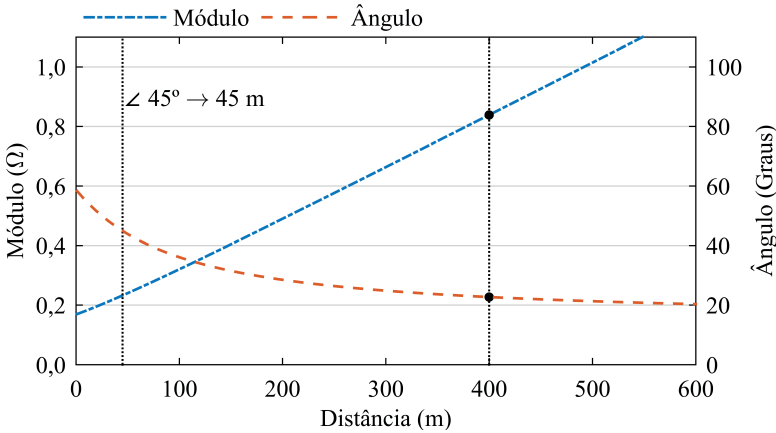
Fonte: Produção do próprio autor.

Considerando que a referência é a rede, tem-se transferência de potência para a carga quando o ângulo é menor que zero e transferência de potência para a fonte quando o ângulo é maior que zero. O limite de estabilidade estática é atingido quando o ângulo δ alcança $\pm 90^\circ$ (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Na prática as linhas operam com ângulos de até $\pm 45^\circ$ pois a partir deste ponto são necessários incrementos muito grandes no ângulo de abertura para um pequeno aumento na potência ativa transferida sendo inviável do ponto de vista do sistema elétrico.

Para se obter uma análise próxima de casos reais encontrados nas linhas de distribuição, é considerado um transformador com potência de 30 kVA, com impedância de 3,5% e um cabo de alumínio nu com alma de aço (CAA), 4 AWG e com resistência R_c igual a 1,7179 Ω/Km @ 75°C e reatância X_c igual a 0,4495 Ω/Km (CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A., 2015).

A Figura 6 mostra a variação da impedância total ao longo da linha de distribuição com 600 metros de comprimento. Inicialmente tem-se um valor quase totalmente indutivo, pois somente a impedância do transformador é vista. Com o aumento da distância a parcela resistiva torna-se significativa e não pode ser desprezada. Ainda, pode ser visto que com apenas 71 metros as parcelas resistivas e indutivas possuem a mesma proporção.

Figura 6 - Variação da impedância total com a variação da distância final da linha de distribuição.



Fonte: Produção do próprio autor.

Portanto, as análises que se seguem terão como base a distância de 400 metros e valor de impedância $|Z_g|$ igual a 0,1735 pu, ângulo ϕ igual a 22,69° e relação R_g/X_g igual a 2,392, sendo esta uma relação próxima de relações encontradas em linhas de distribuição (OURY; BERGERON; LAPERRIERE, 1997). A Agora com as impedâncias totais definidas, pode-se observar que a eq. (7) possui quatro soluções possíveis para V_{PCC} , duas delas negativas que não têm significado físico e serão desprezadas. As outras soluções são os valores da tensão eficaz no PCC. Com estas respostas pode-se compor a tensão no PCC em função da potência ativa que é transmitida pela linha.

Tabela 3 resume os parâmetros de resistência e indutância das impedâncias obtidas.

Agora com as impedâncias totais definidas, pode-se observar que a eq (7). possui quatro soluções possíveis para V_{PCC} , duas delas negativas que não têm significado físico e serão desprezadas. As outras soluções são os valores da tensão eficaz no PCC. Com estas respostas pode-se compor a tensão no PCC em função da potência ativa que é transmitida pela linha.

Tabela 3 - Parâmetros de impedância de linha obtidos para distância de 400 m.

Parâmetros	Resistência (R_g)	Indutância (L_g)	Relação (R_g / X_g)
Impedância dos Cabos	687,2 mΩ	476,9 μH	3,822
Impedância do Transformador	87,4 mΩ	381,96 μH	0,607
Impedância Total	774,6 mΩ	858,9 μH	2,392

Fonte: Produção do próprio autor.

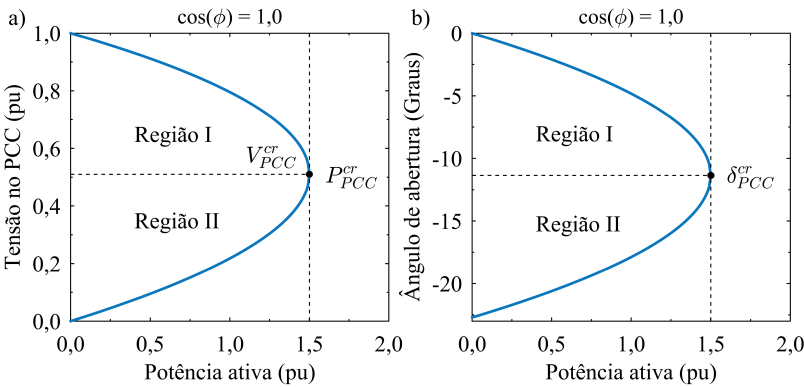
O gráfico da Figura 7 é obtido variando a potência transmitida com fator de potência constante, obtendo assim o valor eficaz da tensão no PCC. A curva mostra que com o aumento da potência transmitida a tensão tende a diminuir, atingindo seu limite no ponto de máxima potência (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

Pode-se dividir o gráfico em duas regiões, I e II. Na região I a transmissão é dita estável, pois, um aumento na demanda causa uma queda no valor de tensão, que resulta em um aumento na potência entregue a carga. Já a região II é considerada insustentável, pois, para um acréscimo de potência seria necessário um aumento no valor da tensão, podendo levar o sistema a instabilidade (SIMÕES; SILVEIRA, 2002).

Nesta curva existe um ponto de tensão crítica para a potência crítica de transmissão, vinculados a um ângulo de abertura crítico, são os pontos que definem a potência limite que a linha consegue transmitir e um ângulo de abertura máximo (AGUIAR, 2011).

A partir da Região I, são obtidas curvas para diferentes fatores de potência, possibilitando uma visão mais ampla sobre o perfil do valor da tensão eficaz no PCC em diversas condições de potência e fator de potência da carga.

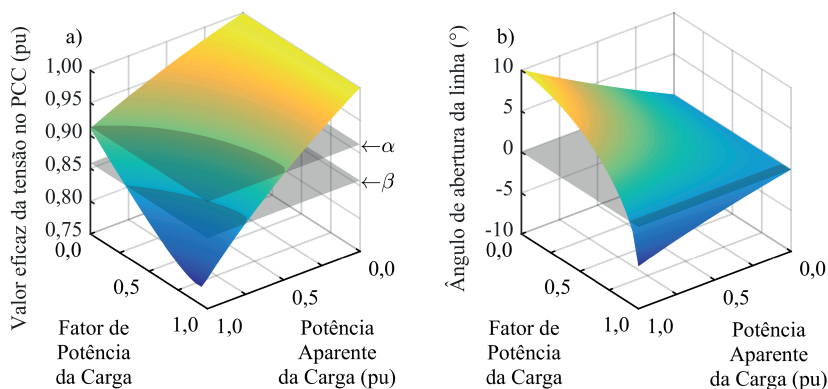
Figura 7 - Gráficos do valor eficaz da tensão no PCC (a) e do ângulo de abertura da linha (b) em função da potência ativa transmitida.



Fonte: Produção do próprio autor.

Pode ser observada na Figura 8 (a) a superfície que representa a de tensão no PCC e dois planos horizontais “ α ” e “ β ”. O plano “ α ” define o limite para a classificação adequada da tensão (0,9134 pu), o plano “ β ” define o limite para a classificação precária (0,8583 pu) e abaixo deste plano a tensão é considerada crítica. Na Figura 8 (b) a superfície representa o ângulo de abertura e o plano define ângulo zero.

Figura 8 - Gráficos do valor eficaz da tensão no PCC (a) e ângulo de abertura da linha (b) em função da potência aparente da carga e seu fator de potência ($|Z_g| = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$; $V_g = 1,000$ pu).



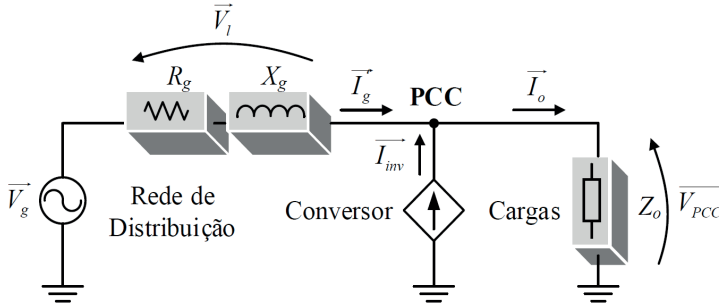
Fonte: Produção do próprio autor.

A superfície de tensão no PCC mostra que com o aumento de potência e do fator de potência da carga a tensão cai abaixo dos limites para fornecimento adequado. Neste caso faz-se necessária alguma medida de correção ou a concessionária estará sujeita a multas e ressarcimentos aos consumidores afetados.

2.1 CONEXÃO DO CONVERSOR NO PCC

O conversor é conectado ao PCC a fim de fornecer potência ativa e reativa para as cargas e elevar o valor eficaz da tensão no PCC conforme a estratégia de regulação. Como o conversor é controlado e impõe uma corrente definida no PCC, o circuito equivalente é alterado para o circuito da Figura 9, fazendo com que o valor eficaz da tensão possa ser regulado através da quantidade de corrente em quadratura e em fase que são traduzidas em potência reativa e ativa que são injetadas no sistema pelo conversor.

Figura 9 - Circuito equivalente do sistema de distribuição de energia elétrica com conversor e cargas conectadas ao PCC.



Fonte: Produção do próprio autor.

O circuito passa a ter mais uma componente de corrente I_{inv} resultando na eq. (9) e que anteriormente era representado pela eq. (2).

$$\vec{V}_g = \vec{V}_{PCC} + \vec{V}_l = \vec{V}_{PCC} + Z_g \cdot (\vec{I}_g - \vec{I}_{inv}). \quad (9)$$

Agora, substituindo as correntes da rede, do conversor e multiplicando pelo complexo conjugado de \vec{V}_{PCC} em ambos os lados, tem-se:

$$\left\{ \vec{V}_g = \vec{V}_{PCC} + Z_g \cdot \left[\left(\frac{S_o}{\vec{V}_{PCC}} \right)^* - \left(\frac{S_{inv}}{\vec{V}_{PCC}} \right)^* \right] \right\} \cdot \vec{V}_{PCC}^* \quad (10)$$

Sendo que a tensão sobre o inversor é a mesma tensão a que o PCC está submetido $V_{inv} = V_{PCC}$ pode-se reescrever de forma semelhante à eq.(4)

$$\vec{V}_g \cdot \vec{V}_{PCC}^* = V_{PCC}^2 + Z_g \cdot (S_o^* - S_{inv}^*). \quad (11)$$

Substituindo as potências aparentes pelas componentes ativas e reativas, e rearranjando a equação:

$$\vec{V}_g \cdot \vec{V}_{PCC}^* = V_{PCC}^2 + Z_g \cdot [(P_o - P_{inv}) + j \cdot (Q_{inv} - Q_o)]. \quad (12)$$

Agora transformando a equação representada por fasores na forma polar para forma retangular e considerando que $\angle V_g = \angle V_g < 0^\circ$ e $\angle V_{PCC} = \angle V_{PCC} < -0^\circ$, obtém-se:

$$V_g V_{PCC} [\cos(-\theta) + j \cdot \sin(-\theta)] = V_{PCC}^2 + (R_g + jX_g) \cdot [(P_o - P_{inv}) - j \cdot (Q_o - Q_{inv})]. \quad (13)$$

Então separando as partes reais e imaginárias e aplicando algumas propriedades trigonométricas das funções seno e cosseno:

$$\begin{cases} V_g V_{PCC} \cdot \cos(\theta) = V_{PCC}^2 + R_g (P_o - P_{inv}) + X_g (Q_o - Q_{inv}) \\ V_g V_{PCC} \cdot \sin(\theta) = R_g (Q_o - Q_{inv}) - X_g (P_o - P_{inv}) \end{cases} \quad (14)$$

Elevando ao quadrado ambos os lados das equações e somando chega-se a uma equação que representa o valor eficaz da tensão no PCC em função das potências que são consumidas pela carga e pela impedância total da linha, conforme eq. (15).

$$\begin{aligned} V_{PCC}^4 + V_{PCC}^2 \cdot [2 \cdot A - V_g^2] + [B^2 + A^2] &= 0 \\ \begin{cases} A = R_g (P_o - P_{inv}) + X_g (Q_o - Q_{inv}) \\ B = R_g (Q_o - Q_{inv}) - X_g (P_o - P_{inv}) \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

onde V_{PCC} é o módulo da tensão no PCC, V_g é o módulo tensão na fonte, R_g e X_g são as impedâncias da linha, P_o e Q_o são as potências fornecidas a carga e P_{inv} e Q_{inv} são as potências fornecidas pelo conversor.

O ângulo de abertura da linha (δ) pode ser obtido através da seguinte relação:

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{B}{V_g V_{PCC}} \right) \quad (16)$$

As equações (15) e (16) podem ser utilizadas para avaliar a injeção de corrente pelo conversor no PCC, sendo potência ativa ou reativa, para se obter o valor desejado da regulação de tensão, além de se obter o ângulo de abertura da linha para cada valor de potência injetada.

A seguir serão apresentados os casos de compensação de reativos, injeção de energia ativa e a combinação de potência ativa e reativa.

2.2 ESTRATÉGIAS DE COMPENSAÇÃO

A regulação do valor eficaz da tensão no PCC pode ser feita injetando energia reativa ou ativa, sendo que a energia reativa tem a principal compensação sobre a parcela indutiva da linha e a energia ativa tem a principal compensação sobre a parcela resistiva da linha.

É apresentada a compensação por reativos, onde é injetada corrente em quadratura (90°) com a tensão no PCC, em seguida é apresentada a compensação por energia ativa onde é injetada corrente em fase (0°) com a tensão no PCC. Os efeitos de cada tipo de compensação são mostrados nos capítulos a seguir.

As perdas do conversor e a energia para sua manutenção serão consideradas nulas nestas análises, porém sabe-se que na prática existe um pequeno consumo de potência ativa devido às perdas nos componentes de potência, filtros de saída, barramentos e circuitos de controle e condicionamento.

2.2.1 Compensação por energia reativa

A compensação do valor eficaz da tensão utilizando energia reativa é bem conhecido na literatura, podendo ser pelo controle da corrente injetada (DA CUNHA, 2015), (JAYAPRAKASH; SINGH; KOTHARI, 2009), (XU; LI, 2014) ou da tensão no PCC (HOCK, 2015), (ENDERLE *et al.*, 2012), (KUMAR; MISHRA, 2014), (MISHRA; GHOSH; JOSHI, 2003). Neste trabalho é utilizado o controle de corrente do conversor para a regulação do valor eficaz da tensão no PCC.

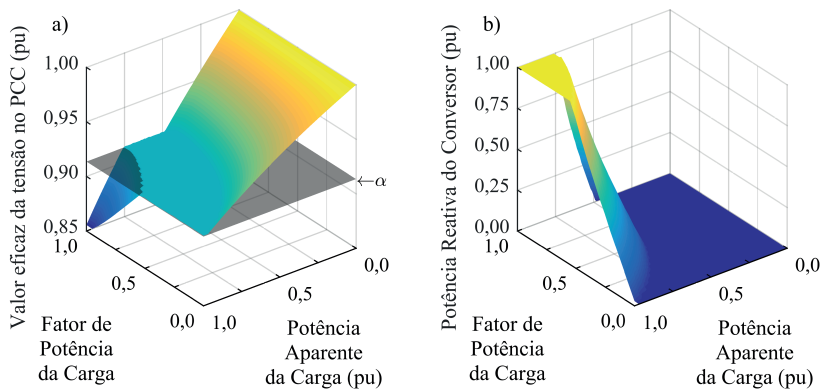
Para que somente energia reativa seja utilizada na regulação, a energia ativa injetada é fixada em zero, sendo válida a seguinte condição:

$$Q_{inv} > 0 \quad ; \quad P_{inv} = 0$$

Na Figura 10 (a) é apresentado o valor eficaz da tensão no PCC e em (b) o valor da potência reativa do conversor (Q_{inv}), onde observa-se que com o aumento da potência e do fator de potência da carga ocorre a queda até o limite adequado de tensão, a partir deste ponto o conversor começa a injetar a energia reativa necessária para manter o valor de tensão eficaz no valor estabelecido como referência.

Próximo a potência máxima da carga não é mais possível elevar a tensão devido ao limite estabelecido para potência do conversor, a partir desse ponto ocorre a redução do valor da tensão eficaz, ultrapassando o limite de tensão adequada, neste caso o plano “ α ”.

Figura 10 - Gráficos do valor eficaz da tensão no PCC (a) e potência reativa do conversor (b) em função da potência aparente da carga e seu fator de potência para limite mínimo adequado de tensão. ($V_{min} = 0,9136$ pu; $|Z_g| = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$; $V_g = 1,000$ pu).



Fonte: Produção do próprio autor.

2.2.2 Compensação por energia ativa

Agora a análise parte do ponto de vista que existe somente energia ativa para efetuar a elevação do valor da tensão eficaz. Neste ponto a energia reativa injetada para a regulação de tensão é fixada em zero, sendo válida a seguinte condição:

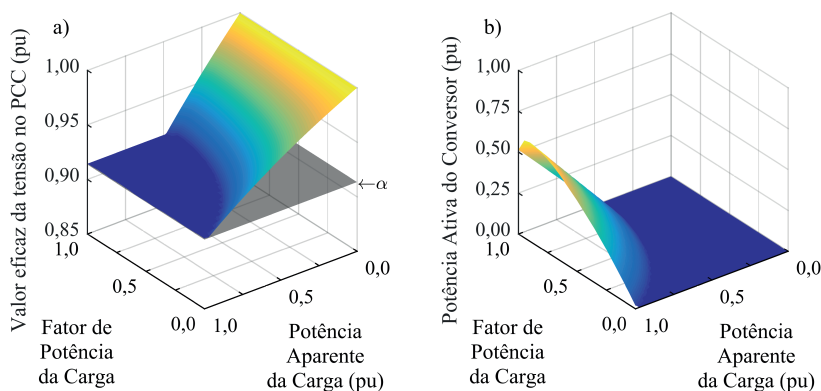
$$Q_{inv} = 0 \quad ; \quad P_{inv} > 0$$

Existem trabalhos na literatura que efetuam a injeção de energia ativa na rede elétrica, principalmente oriundas de fontes de energia renováveis, como solar, eólica ou ainda de energia armazenada, porém não tem como objetivo a regulação de tensão no PCC (PRODANOVIC; GREEN, 2003) (MOHAMED; A-RAHMAN; SEETHAPATHY, 2012) (YANG; RUAN; WU, 2014).

São mostrados na Figura 11 os gráficos do valor de tensão eficaz no PCC (a) e energia ativa do conversor (b). É possível verificar que quando a tensão atinge o limite estabelecido ocorre a injeção de energia ativa necessária para elevar a tensão ao nível de fornecimento adequado.

Comparando com o caso anterior pode-se concluir que a quantidade de energia ativa injetada é menor que de energia reativa para elevar a tensão para o mesmo nível. Isto ocorre neste caso porque a característica da linha de distribuição em análise possui uma parcela resistiva maior do que a parcela indutiva na impedância da linha.

Figura 11 - Gráficos do valor eficaz da tensão no PCC (a) e da potência ativa do conversor (b) em função da potência aparente da carga e seu fator de potência para limite mínimo adequado de tensão. ($V_{min} = 0,9136$ pu; $|Z_g| = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$; $V_g = 1,000$ pu).



Fonte: Produção do próprio autor.

2.2.3 Compensação por energia ativa e reativa

Agora será analisada a compensação com a possibilidade de se utilizar energia ativa e reativa em conjunto, adotando uma estratégia para priorizar a energia reativa na compensação. Será considerado que inicialmente deve-se utilizar energia reativa até que esta não consiga mais elevar a tensão para o nível desejado. Somente a partir deste ponto é que a energia ativa é inserida em complemento à energia reativa.

A estratégia de regulação tem seu funcionamento mostrado em duas malhas e as seguintes condições foram estipuladas:

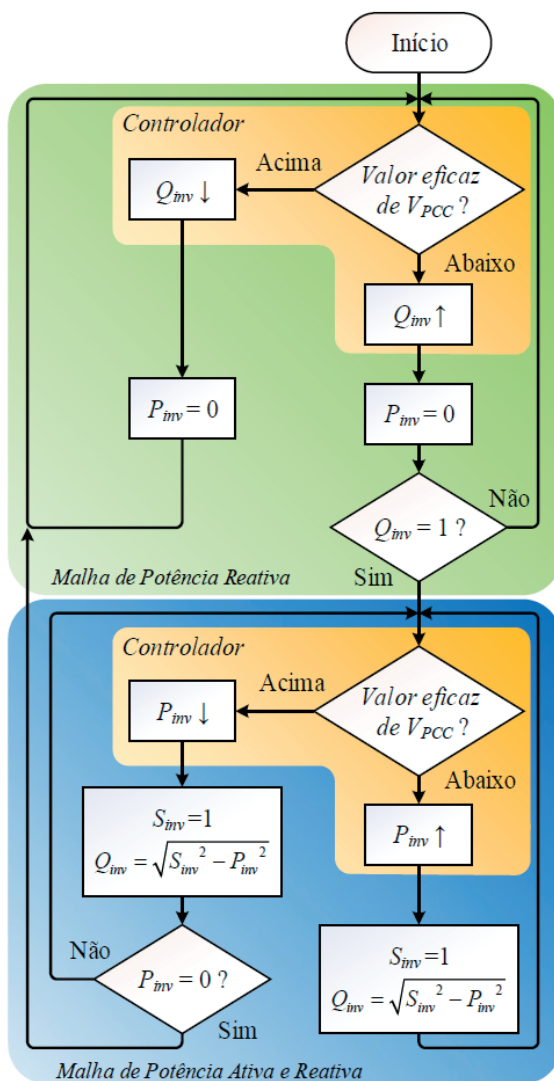
- ✓ As trocas entre malhas devem ser suaves, não permitindo que mais do que um controlador atue sobre a referência;
- ✓ Na entrada da malha de energia ativa esta deve ser habilitada com valor nulo e a energia reativa desabilitada com valor máximo (1 pu);
- ✓ Na saída da malha de energia ativa esta deve ser desabilitada com valor nulo e a energia reativa habilitada com valor máximo (1 pu);
- ✓ Quando a malha de energia reativa estiver atuando a energia ativa deve permanecer em zero;
- ✓ Quando a malha de energia ativa estiver atuando a energia reativa deve ser fixada pela malha no valor complementar para que a potência aparente não ultrapasse a capacidade máxima do conversor;

No fluxograma da Figura 12 o processo se inicia verificando se o valor eficaz da tensão está abaixo ou acima da referência. Se estiver acima da referência a energia reativa deve diminuir, se estiver abaixo a energia reativa deve aumentar, em seguida é verificado se o limite de reativos está saturado. Se não estiver saturada o ciclo se recomeça. Este é o funcionamento da compensação tradicional com energia reativa.

Porém, se identificado pelo controle que houve a saturação de reativos, ocorre a troca da malha de energia. Então é verificado novamente se o valor eficaz da tensão está abaixo ou acima da referência. Se o valor permanecer abaixo da referência, a energia ativa deve aumentar e a energia reativa reduzir, de forma a manter a potência aparente igual a 1 pu, para não exceder os limites do conversor.

Se o valor estiver acima da referência de tensão, deve-se reduzir a energia ativa e consequentemente a energia reativa irá aumentar para manter a potência aparente do conversor em 1 pu. Isto é feito para que a transição entre malhas seja suave e a transição de malhas obedeça as condições previamente estabelecidas. Então o valor de potência ativa é testado para o valor nulo. Se não estiver nulo a malha retorna no ponto de teste da tensão eficaz. Estando no valor nulo, ocorre o retorno para a malha de reativos.

Figura 12 - Fluxograma das malhas de energia com priorização da energia reativa em relação a energia ativa para regulação do valor eficaz da tensão.

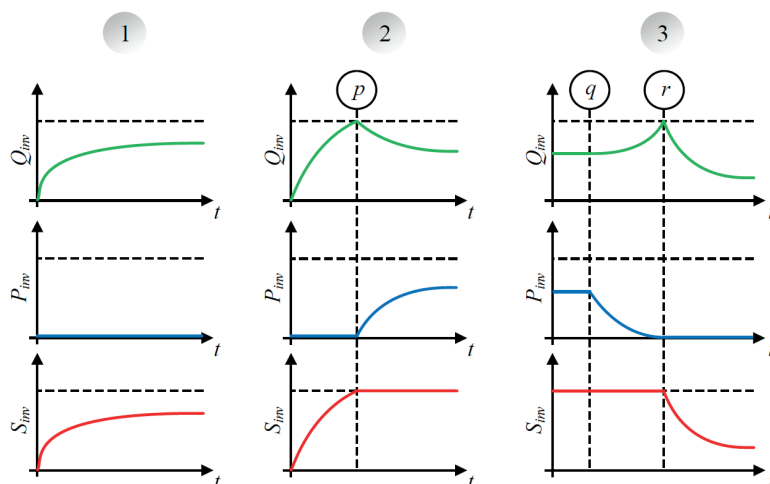


Fonte: Produção do próprio autor.

Esta estratégia tem como fundamento que a energia ativa vem de uma fonte de disponibilidade limitada e reduzida. Em contrapartida a energia reativa é obtida da própria rede facilitando sua utilização.

Na Figura 13 são exemplificados o funcionamento de três casos da malha de gerenciamento das energias. No caso 1, ocorre a utilização de energia reativa, não sendo necessário energia ativa. No caso 2, ocorre a utilização da energia reativa e após o instante "p" a utilização da energia ativa. No caso 3, acontece uma variação de carga, no instante "q", não sendo necessária a utilização de energia ativa. Portanto, esta decresce até chegar no valor zero, no instante "r", e a energia reativa reduz até atingir o patamar necessário para regulação da tensão.

Figura 13 - Gráficos de exemplificação de casos possíveis para a malha de gerenciamento de energia ativa e reativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Definida então a estratégia de regulação, com as malhas de gerenciamento da energia, pode-se compor os gráficos da tensão no PCC com o conversor conectado.

Observando a Figura 14, tem-se o valor eficaz da tensão no PCC, o ângulo de abertura da linha (δ), as potências ativa (P_{inv}), reativa (Q_{inv}) e aparente (S_{inv}) do conversor. Fica evidente que a energia reativa é inserida logo que a tensão atinge o limite estabelecido, e a energia ativa somente é inserida quando não é mais possível a compensação com energia reativa.

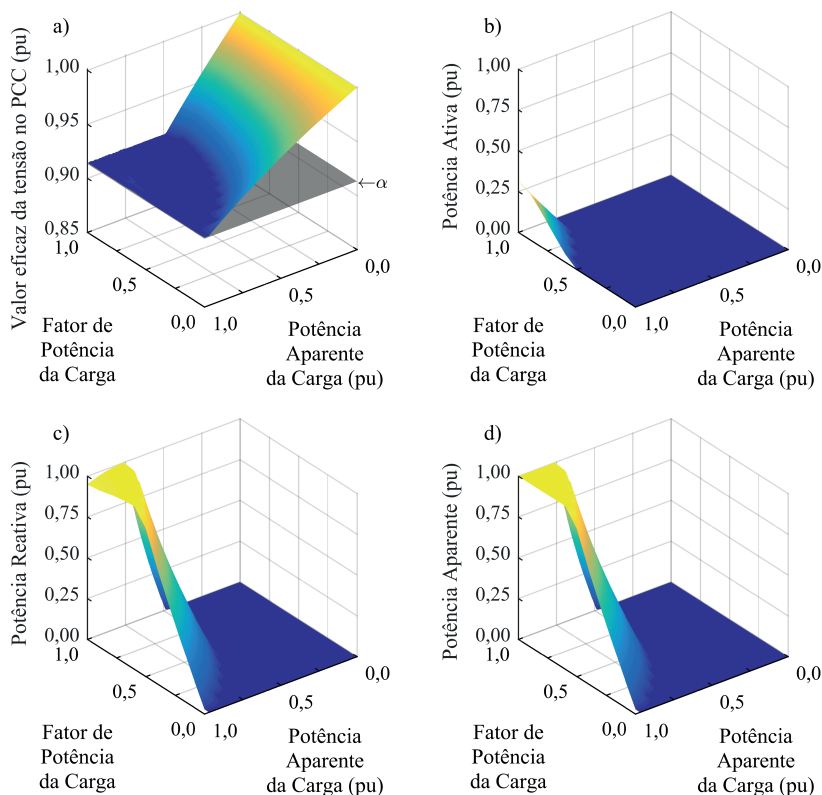
No caso em que o valor eficaz mínimo estipulado como referência de 0,9136 pu, ocorre a injeção de uma pequena quantidade de energia ativa, pois a energia reativa consegue compensar quase toda a queda do valor da tensão eficaz no PCC.

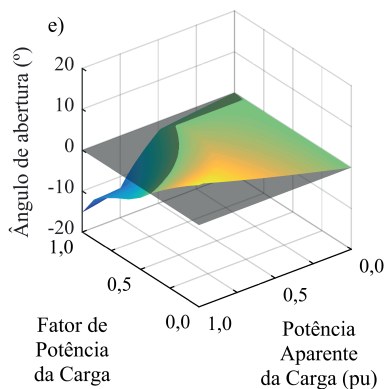
Foram estipulados mais dois valores diferentes como referência de tensão eficaz no PCC para se avaliar o funcionamento da estratégia.

Na Figura 15 tem-se o valor da tensão eficaz no PCC, o ângulo de abertura da linha (δ), as potências, ativa (P_{inv}), reativa (Q_{inv}) e aparente (S_{inv}) do conversor para uma tensão eficaz de referência fixada em 0,9500 pu, e verifica-se uma maior quantidade de energia ativa utilizada na compensação.

Já na Figura 16 tem-se o valor da tensão eficaz no PCC, o ângulo de abertura da linha (δ), as potências, ativa (P_{inv}), reativa (Q_{inv}) e aparente (S_{inv}) do conversor para uma tensão eficaz de referência de 1,0000 pu, onde utiliza-se muito mais energia ativa do que os casos anteriores.

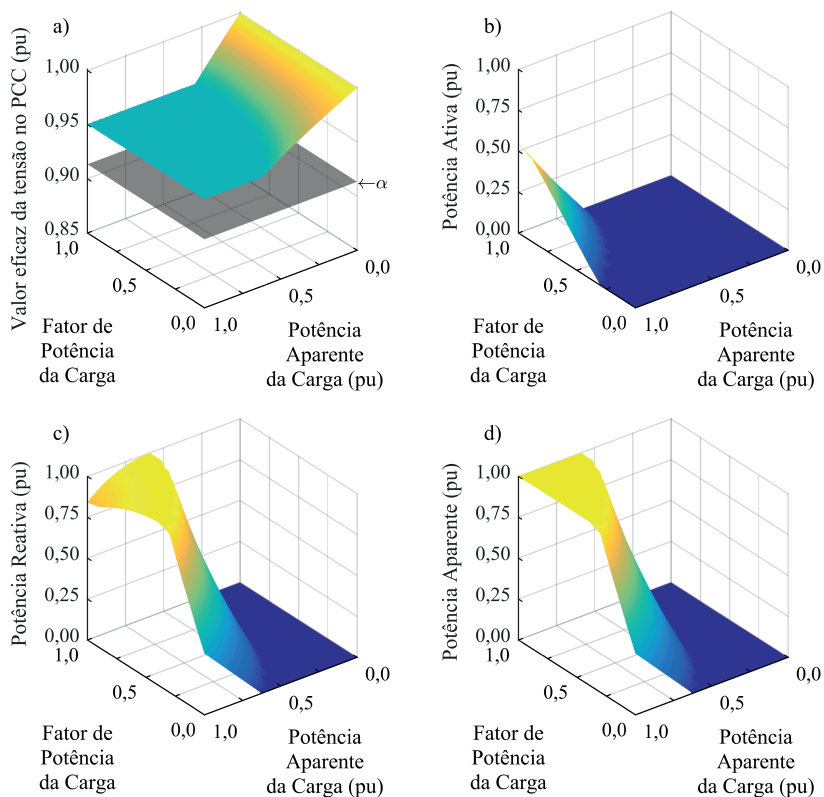
Figura 14 - Gráficos: a) Valor da tensão eficaz no PCC, b) Potência ativa (P_{inv}), c) Potência reativa (Q_{inv}), d) Potência aparente (S_{inv}) injetadas para limite mínimo adequado de tensão eficaz e e) Ângulo de abertura da linha (δ) ($V_{min} = 0,9136$ pu; $|Z_g| = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$)

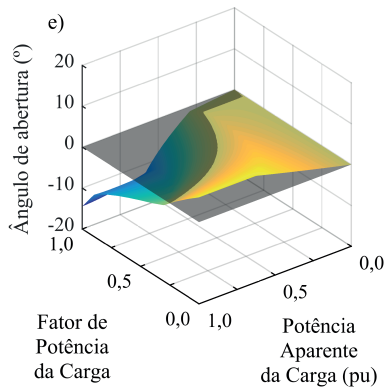




Fonte: Produção do próprio autor.

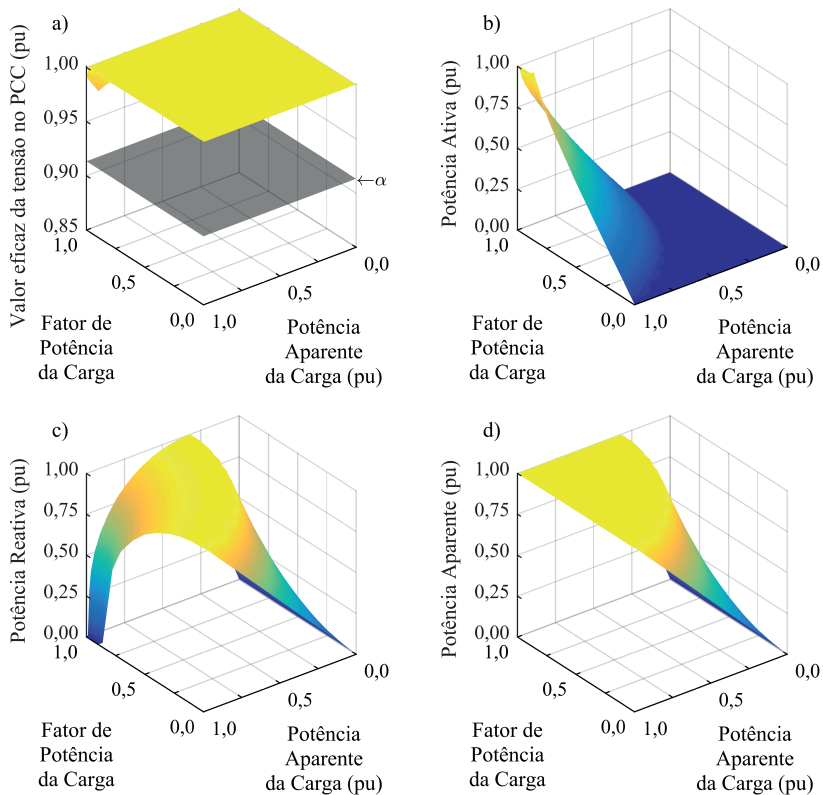
Figura 15 - Gráficos: a) Valor da tensão eficaz no PCC, b) Potência ativa (P_{inv}), c) Potência reativa (Q_{inv}), d) Potência aparente (S_{inv}) injetadas para referência de tensão eficaz intermediária e e) Ângulo de abertura da linha (δ) ($V_{min} = 0,9500$ pu; $|Z_g| = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$).

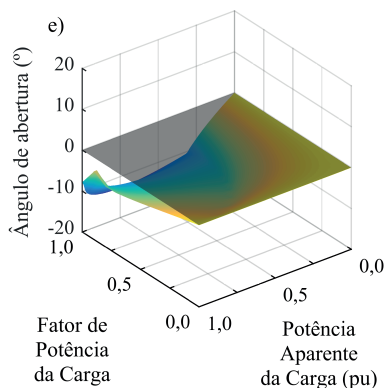




Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 16 - Gráficos: a) Valor da tensão eficaz no PCC (V_{PCC}), b) Potência ativa (P_{inv}), c) Potência reativa (Q_{inv}), d) Potência aparente (S_{inv}) injetadas para limite de tensão eficaz próximo ao unitário e e) Ângulo de abertura da linha (δ) ($V_{min} = 1,0000$ pu; $|Z_g| = 0,1735$ pu; $\phi = 22,69^\circ$).





Fonte: Produção do próprio autor.

2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo são apresentadas as análises do fluxo de potências em redes de distribuição de baixa tensão, levando em conta as impedâncias do transformador, as impedâncias distribuídas das linhas e das cargas conectadas. Utilizando-se de dados reais para o transformador e para os cabos são definidas as impedâncias de linha próximas dos casos reais permitindo um estudo com possível aplicação real.

A partir dos circuitos equivalentes pode-se obter as equações que definem o valor eficaz da tensão no PCC, e observar a queda de tensão em função das potências das cargas. A comparação com os limites estabelecidos pelas agências reguladoras mostra que existem casos em que o valor da tensão eficaz ultrapassa os limites de fornecimento de tensão, deixando a concessionária sujeita a ressarcimentos e multas aos usuários.

A conexão do conversor no PCC é proposta para que, através do controle de corrente, sejam injetadas potência ativa e reativa. Assim, eleva-se o valor eficaz da tensão no PCC.

São avaliadas as compensações de reativos, injeção de potência ativa e de potência ativa e reativa. Em cada caso são apresentadas as curvas do valor eficaz de tensão no PCC e potência injetada pelo conversor para comparação de eficácia e viabilidade. Para o caso de injeção de potência ativa e reativa são definidas as prioridades de compensação, além das condições de utilização de cada malha de compensação.

Portanto, a partir dos resultados obtidos pode-se estabelecer que a estratégia adotada é adequada para a regulação do valor eficaz da tensão no PCC. Em todos os casos há prioridade da energia reativa, não ocorrendo trocas indesejadas das malhas de compensação e a energia aparente total não excede o limite do conversor.



3 MODELAGEM DO CONVERSOR

Para que o valor da tensão eficaz no PCC seja regulado é necessário que sejam impostas as correntes pelo conversor e como cada sistema possui uma dinâmica diferente são necessários os modelos matemáticos que descrevem as relações de entrada e saída de cada malha de controle, sendo possível assim projetar cada malha para que sejam atingidos os requisitos de projeto.

O funcionamento de todo o sistema torna-se complexo, pois são utilizadas várias malhas de controle, como mostrado no diagrama geral de controle da Figura 17. As referências de corrente que são injetadas na rede elétrica dependem das malhas de tensão eficaz no PCC, além das malhas de controle de tensão total e diferencial do barramento cc, além das referências de harmônicos que são utilizados para atenuar o conteúdo harmônico presente na rede elétrica. As malhas que expressam a relação entre a corrente do conversor e a razão cíclica, tensão em função da corrente do conversor, seja em quadratura ou em eixo direto, são obtidas a partir dos modelos matemáticos.

Neste capítulo é apresentada a modelagem do conversor trifásico a quatro fios, com barramento com ponto médio, conectado à rede de distribuição de baixa tensão. Os modelos são obtidos com base nos trabalhos (NISHIOKA, 2011), (KLEIN, 2012) e são utilizadas coordenadas abc , não sendo necessária a transformação de eixos. A estrutura completa de controle do conversor é apresentada ao final do capítulo.

3 MODELAGEM DO CONVERSOR

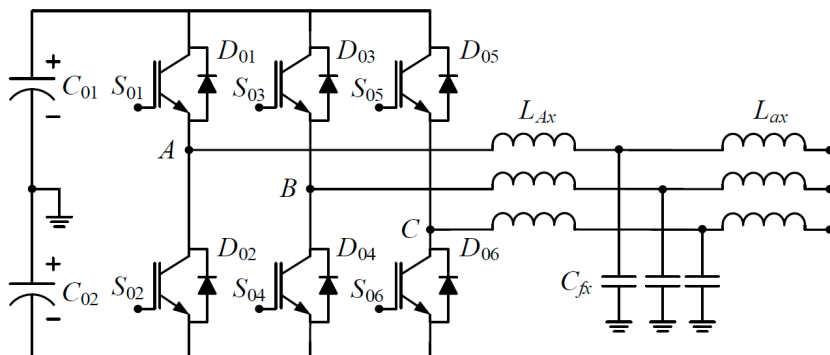


3.1 ESTRUTURA DE POTÊNCIA

A estrutura de potência do conversor cc-ca trifásico é mostrada na Figura 18, composta por seis interruptores $S_{01}, S_{02}, S_{03}, S_{04}, S_{05}, S_{06}$, com diodos em antiparalelo $D_{01}, D_{02}, D_{03}, D_{04}, D_{05}, D_{06}$, tornando-os bidirecionais em corrente, sendo dois interruptores em cada braço, formando três braços monofásicos ao total. Os interruptores são considerados ideais. Todos os braços são conectados ao barramento cc que é composto por dois capacitores, C_{01} e C_{02} , divididos pelo ponto médio conectado ao neutro do sistema. O valor de tensão total em regime no barramento é considerado constante e é igual a E dividido igualmente entre os capacitores considerados ideais.

O conversor é conectado à rede através dos indutores L_{Ax}, L_{Bx} e o capacitor C_{fx} , onde x é o índice de cada uma das fases A, B, C. Este arranjo forma o filtro LCL do estágio de saída.

Figura 18 - Estrutura de potência do conversor cc-ca com filtro LCL de saída.



Fonte: Produção do próprio autor.

Como cada braço do conversor opera de forma independente, pode-se analisar o circuito de forma monofásica. Os interruptores de um mesmo braço operam de forma complementar, sendo que quando o interruptor superior (S_{01}) estiver conduzindo o valor de tensão de fase $+E/2$ será aplicado e quando o interruptor inferior (S_{02}) estiver conduzindo o valor de tensão $-E/2$ será aplicado, produzindo uma tensão de saída de dois níveis na frequência de comutação. É utilizada a modulação por largura de pulso em alta frequência para sintetizar a tensão de saída.

3.2 MODELOS MATEMÁTICOS

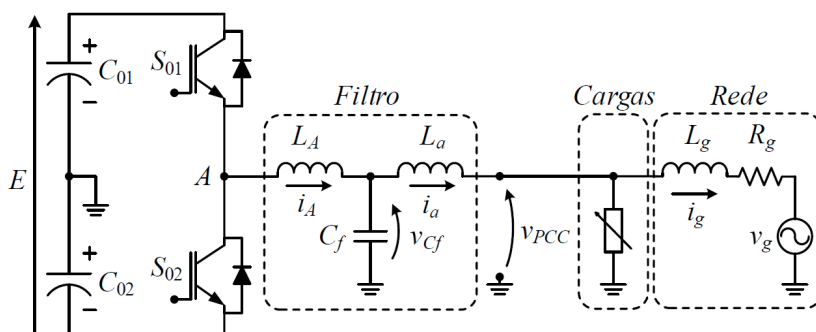
Os modelos matemáticos abaixo serão obtidos para projetar os sistemas de controle, uma vez que controladores lineares são utilizados para impor o valor das referências de corrente e tensão desejadas na rede.

- A função de transferência que representa a dinâmica da variação da corrente de saída pela variação da razão cíclica;
- A função de transferência que representa a dinâmica da variação da corrente de saída pela variação da tensão de saída;
- A função de transferência que representa a dinâmica da variação de tensão no capacitor do filtro pela razão cíclica;
- A função de transferência que representa a dinâmica da variação do valor eficaz de tensão no PCC pela variação da corrente no indutor de saída do filtro;
- A função de transferência que representa a dinâmica da variação do valor total tensão do barramento pela variação da corrente direta drenada pelo conversor;
- A função de transferência que representa a dinâmica da variação do valor diferencial tensão do barramento pela variação da corrente média drenada pelo conversor;
- A função de transferência que representa a dinâmica do modulador *PWM*;

3.2.1 Modelo da Corrente de Saída

O conversor trifásico pode ser representado pela estrutura monofásica da Figura 19, pois possui o ponto médio do barramento conectado ao neutro do sistema. Assim cada fase possui um controle independente para controle das dinâmicas de corrente. São apresentados os modelos obtidos em espaço de estados para o inversor com filtro de terceira ordem e em seguida obtidos os modelos de pequenos sinais.

Figura 19 - Circuito equivalente monofásico do inversor, filtro terceira ordem e tensão da rede para obtenção dos modelos de transferência.

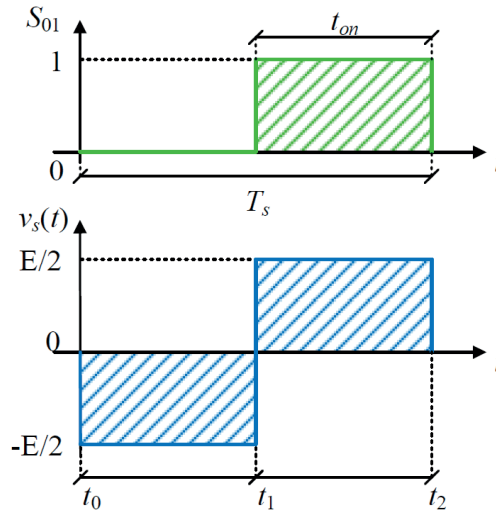


Fonte: Produção do próprio autor.

Devido à baixa ondulação de tensão o barramento pode ser considerado uma fonte ideal de tensão E , sendo igualmente dividido em $\pm E/2$ pelo ponto médio. O filtro é considerado ideal sem a presença de resistências, uma vez que este seria o pior caso para o sistema de controle, pois não há atenuação da ressonância do filtro.

A Figura 20 mostra o estado do interruptor superior da fase A, sendo complementar ao interruptor inferior e análogo às demais fases do conversor. A tensão de saída, em função dos estados das chaves possui dois níveis e também é mostrada.

Figura 20 - Tensão aplicada no ponto "A" no intervalo de comutação.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 20, $v_s(t)$ é a tensão sobre o ponto "A", tomando como referência o ponto médio dos capacitores do barramento cc, $d(t)$ é a razão cíclica, ou seja, a razão entre o tempo em que o sinal permanece em nível lógico alto e período de comutação (T_s), definido como: $d = (t_2 - t_1)/T_s$.

O valor médio quase-instantâneo da tensão no terminal A, é definido como (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2001):

$$\langle v_{s,A}(t) \rangle_{T_s} = \frac{1}{T_s} \int_{t_0}^{t_2} v_{s,A}(t) \cdot dt = \frac{1}{T_s} \left[\int_{t_0}^{t_1} \frac{E}{2} \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} -\frac{E}{2} \cdot dt \right]. \quad (17)$$

Agora, integrando e substituindo os limites:

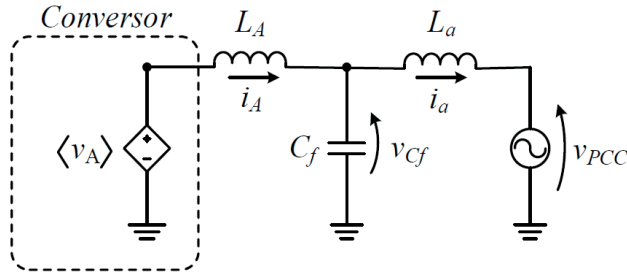
$$\langle v_{s,A}(t) \rangle_{T_s} = E \cdot \left(d_a(t) - \frac{1}{2} \right). \quad (18)$$

Linearizando e aplicando a transformada de Laplace tem-se:

$$\langle V_{s,A}(s) \rangle_{T_s} = E \cdot D_a(s). \quad (19)$$

Na Figura 21 observa-se o circuito equivalente onde os interruptores e o barramento podem ser substituídos por uma fonte de tensão controlada com valor médio quase-instantâneo descrito pelas eq. (18) no domínio tempo e eq. (19) no domínio da frequência.

Figura 21 - Circuito equivalente monofásico do conversor, filtro LCL e tensão no PCC para obtenção das funções de transferência.



Fonte: Produção do próprio autor.

A tensão sobre o indutor do lado da rede:

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} = v_{Cf}(t) - v_{PCC}(t) \quad (20)$$

A tensão sobre o indutor do lado do conversor:

$$L_A \frac{di_A(t)}{dt} = \langle v_{s,A}(t) \rangle_{T_s} - v_{Cf}(t) \quad (21)$$

A corrente no capacitor do filtro:

$$C_f \frac{dv_c(t)}{dt} = i_A(t) - i_a(t) \quad (22)$$

Agrupando as equações (20), (21) e (22), substituindo o valor da tensão média quase-instantânea no ponto "A" da eq. (19) e aplicando a transformada de Laplace, tem-se:

$$\begin{aligned}
\frac{di_a(t)}{dt} &= \frac{v_{cf}(t) - v_{pcc}(t)}{L_a} & sI_a(s) &= \frac{1}{L_a} [V_{cf}(s) - V_{pcc}(s)] \\
\frac{di_A(t)}{dt} &= \frac{\langle v_{s,A}(t) \rangle_{T_s} - v_{cf}(t)}{L_A} & sI_A(s) &= \frac{1}{L_A} [E \cdot D_A(s) - V_{cf}(s)] \\
\frac{dv_{cf}(t)}{dt} &= \frac{i_A(t) - i_a(t)}{C_f} & sV_c(s) &= \frac{1}{C_f} [I_A(s) - I_a(s)]
\end{aligned} \tag{23}$$

Considerando a representação em espaço de estados, conforme eq. (24) são reescritas as equações em (23).

$$\begin{aligned}
\dot{\vec{x}} &= \mathbf{A} \cdot \vec{x} + \mathbf{B} \cdot \vec{u} \\
\vec{y} &= \mathbf{C} \cdot \vec{x} + \mathbf{D} \cdot \vec{u}
\end{aligned} \tag{24}$$

O sistema é reescrito em espaço de estados, onde a corrente no indutor do lado do conversor, a corrente no indutor do lado da rede e tensão sobre o capacitor de filtro são as variáveis de estado. A tensão de saída no PCC e a razão cíclica são as variáveis de entrada do sistema.

$$\begin{aligned}
\dot{\vec{x}} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L_a} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_A} \\ -\frac{1}{C_f} & \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_A \\ V_{cf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E}{L_A} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{pcc} \\ D_A \\ 0 \end{bmatrix} \\
\vec{y} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_A \\ V_{cf} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{25}$$

A função de transferência que representa a dinâmica da variação da corrente de saída pela variação da razão cíclica é representada pela eq. (26). Esta função é de terceira ordem e possui um polo na origem e dois polos complexo conjugados.

$$G_{I_A}(s) = \frac{I_a(s)}{D_A(s)} = \frac{E}{s[s^2 \cdot L_A L_a C_f + (L_A + L_a)]}. \tag{26}$$

A função de transferência que representa a dinâmica da variação da corrente de saída pela variação da tensão de saída é representada pela eq. (27). Esta função também é de terceira ordem porém possui dois zeros em adição aos polos.

$$G_{V_A}(s) = \frac{I_a(s)}{V_{PCC}(s)} = \frac{-s^2 \cdot L_A C_f - 1}{s[s^2 \cdot L_A L_a C_f + (L_A + L_a)]}. \quad (27)$$

A função de transferência que representa a dinâmica da variação do valor de tensão no capacitor do filtro pela razão cíclica é representada pela eq. (28). Esta função é de segunda ordem sendo dois polos complexo conjugados.

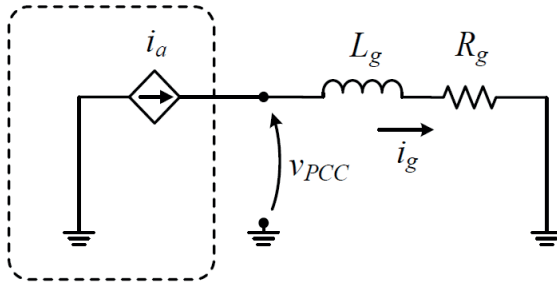
$$G_{V_{cfa}}(s) = \frac{V_C(s)}{D_A(s)} = \frac{s \cdot E \cdot L_a}{s[s^2 \cdot L_A L_a C_f + (L_A + L_a)]}. \quad (28)$$

3.2.2 Modelo da Tensão Eficaz no PCC

É utilizado o princípio da superposição para se obter a função de transferência que representa a dinâmica da variação do valor de tensão eficaz no PCC pela variação da corrente no indutor de saída do filtro. Como deseja-se obter somente a influência da corrente que o conversor injeta na rede, são desprezadas as cargas e a fonte de tensão da rede, conforme Figura 22.

A corrente controlada no filtro LCL é a corrente no indutor do lado da rede, portanto o conjunto conversor-filtro é substituído por uma fonte de corrente controlada.

Figura 22 - Circuito equivalente monofásico do inversor, filtro, cargas e rede para obtenção do modelo de tensão no PCC em função da corrente de saída do conversor.



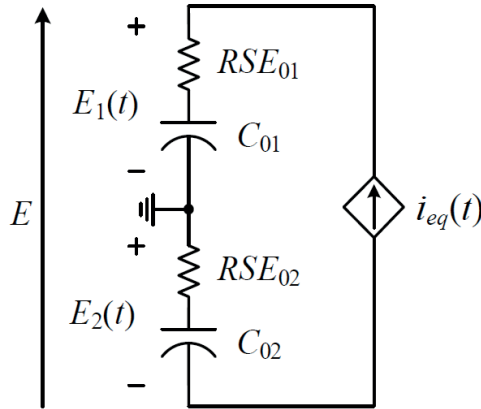
O modelo para o circuito acima depende exclusivamente das impedâncias da linha. A função transferência é mostrada da eq. (29):

$$G_{V_{PCC}}(s) = \frac{V_{PCC}(s)}{I_a(s)} = \frac{1}{s \cdot L_g + R_g}. \quad (29)$$

3.2.3 Modelo da Tensão Total de Barramento

O circuito é reescrito de forma que o barramento observe uma corrente média equivalente de entrada para se obter a função de transferência que representa a dinâmica da variação do valor de tensão total de barramento pela variação da corrente direta drenada pelo conversor, conforme Figura 23.

Figura 23 - Circuito equivalente para modelo de tensão total do barramento.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os capacitores são representados por C_{01} e C_{02} , e suas respectivas resistências internas RSE_{01} e RSE_{02} . Sobre cada capacitor do barramento tem-se a tensão respectiva $E_1(t)$ e $E_2(t)$. A tensão total de barramento é representada por $E(t)$ e a corrente equivalente vista pelo barramento por $i_{eq}(t)$. A função de transferência leva em conta o balanço de potência de entrada, saída do barramento e seu rendimento, conforme eq. (30):

$$P_{out} = \eta \cdot P_{in} \quad (30)$$

Considerando que as tensões e correntes são senoidais, livres de distorção e estão em fase. A potência de entrada trifásica e a potência no barramento são dadas pela eq. (31):

$$\begin{cases} P_{in} = 3 \cdot V_{rms} \cdot I_{rms} \\ P_{out} = E \cdot I_{eq} \end{cases} \quad (31)$$

Considerando os capacitores iguais, a corrente equivalente que circula pelo barramento e a impedância de metade do barramento são dadas pela eq. (32):

$$\begin{cases} I_{eq} = \frac{E}{2 \cdot Z_o} \\ Z_o = \frac{s \cdot C_{01} \cdot RSE_{01} + 1}{s \cdot C_{01}} \end{cases} \quad (32)$$

Fazendo os devidos rearranjos matemáticos nas equações (30), (31) e (32), aplicando a transformada de Laplace, tem-se a função de transferência mostrada na eq. (33):

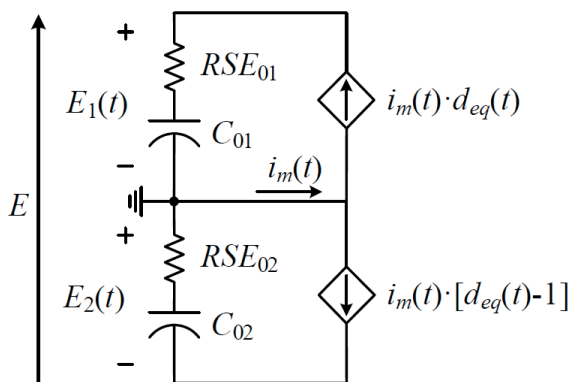
$$G_{Er}(s) = \frac{E(s)}{I_{pk}(s)} = \eta \cdot 3 \cdot \frac{V_{pk}}{V_T} \cdot \left(\frac{s \cdot RSE_1 C_{01} + 1}{s \cdot C_{01}} \right), \quad (33)$$

onde $I_{pk}(s)$ é a corrente de pico, η é o rendimento, V_{pk} é o valor de pico da tensão da rede, V_T é o valor total de barramento em regime. A corrente de pico a ser controlada representa o valor de referência que multiplica a referência em fase de corrente com a rede. Os detalhes do controle são discutidos nos capítulos a seguir.

3.2.4 Modelo da Tensão Diferencial de Barramento

O circuito equivalente é reescrito de forma que uma corrente média seja drenada do barramento para se obter a função de transferência que representa a dinâmica da variação do valor de tensão diferencial de barramento pela variação da corrente média drenada pelo conversor, conforme Figura 24. Fazendo com que seja desigual o consumo de potência momentâneo entre os capacitores do barramento levando ao equilíbrio desejado.

Figura 24 - Circuito equivalente para modelo de tensão diferencial do barramento.



Fonte: Produção do próprio autor.

A corrente média $i_m(t)$ divide-se em duas parcelas de corrente média drenada do barramento $i_m(t) \cdot d_{eq}(t)$ e $i_m(t) \cdot [d_{eq}(t) - 1]$. Logo, a tensão que aparece sobre cada capacitor é representada por $E_1(t)$ e $E_2(t)$ e a diferença entre as tensões é representada por $E_{dif}(t)$ e são mostradas na eq. (34).

$$\begin{cases} E_1(t) = Z_o \cdot i_m(t) \cdot d(t) \\ E_2(t) = Z_o \cdot i_m(t) \cdot [d(t) - 1] \\ E_{dif}(t) = E_1(t) - E_2(t) \end{cases} \quad (34)$$

Agora utilizando a impedância (Z_o) da eq. (32) e a eq. (34) pode-se obter o modelo de tensão diferencial do barramento, mostrada na eq. (35):

$$G_{E_{dif}}(s) = \frac{E_{dif}(s)}{I_m(s)} = 3 \cdot \left(\frac{s \cdot RSE_{01} \cdot C_{01} + 1}{s \cdot C_{01}} \right) \quad (35)$$

3.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O diagrama de potência é apresentado na Figura 25, juntamente com as variáveis de controle. São medidos os valores de corrente nos indutores de saída do filtro de cada fase (i_a, i_b, i_c), os valores de tensão dos capacitores de filtro de cada fase ($v_{cfa}, v_{cfb}, v_{cfc}$) e os valores de tensão no barramento cc (E_1, E_2). Essas variáveis são obtidas através de sensores de corrente ou tensão e passam por um sistema de condicionamento e adequação para que possam ser utilizadas.

Todas as malhas de controle do conversor são sintetizadas na Figura 26, e são utilizadas variáveis de controle para gerar as referências de corrente e tensão de cada malha.

A estratégia de controle do conversor é baseada no controle da corrente que é injetada na rede, consequentemente controlando de forma equivalente a potência que é injetada. A malha de corrente é projetada para que seja uma malha rápida que tenha capacidade de seguir as referências de corrente (I^*) proveniente das outras malhas de controle e gerar uma ação de controle (m_{s1}). A malha de amortecimento ativo utiliza os valores de tensão nos capacitores do filtro (E) para gerar uma ação de controle (m_{s2}) que subtraída da malha de corrente se obtenha uma resposta estável do sistema. O comparador é responsável pela comparação entre ação de controle resultante (m_s) e as portadoras triangulares (V_{tri}), gerando os pulsos de comando dos interruptores.

A malha do valor eficaz da tensão no PCC utiliza o valor eficaz da tensão (v_{PCC}) para gerar uma referência que é multiplicada pelo sinal defasado de 90° da tensão (ref_{90°) ou em fase com a tensão (ref_{0°). É utilizado um circuito de sincronismo para gerar referências em fase e quadratura com as tensões de fase no PCC. Estas malhas

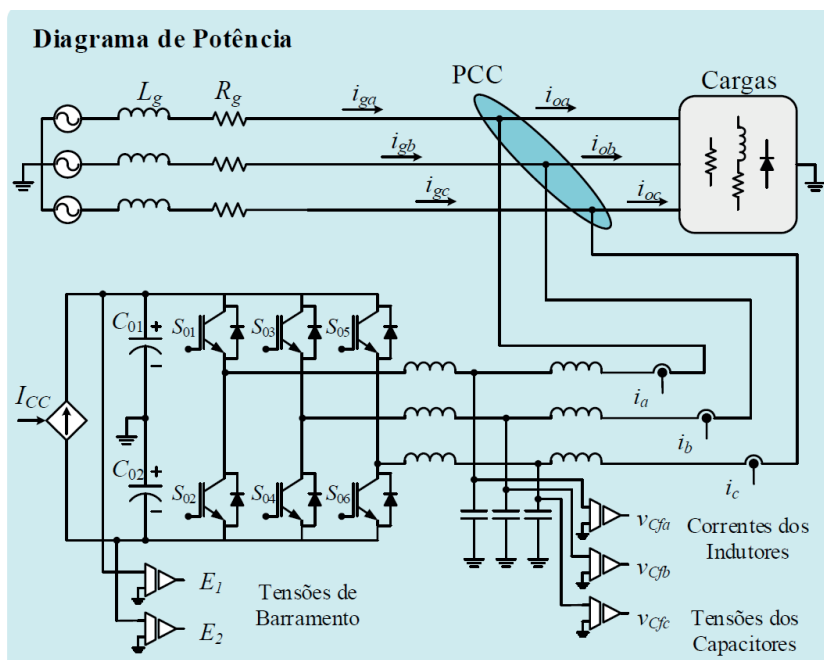
são projetadas para ficarem dinamicamente desacopladas das outras malhas de controle. A estratégia da utilização de energia ativa e reativa que foi descrita em detalhes na seção 2.3.3 agora é aplicada na malha de controle do valor eficaz da tensão no PCC. Para se obter as potências, são utilizadas as referências de corrente em quadratura e em fase. O controle utiliza saturadores com ação *anti-windup* para restringir ou liberar as ações de controle da malha de gerenciamento de energia. Como é utilizado controle digital torna-se fácil a implementação deste sistema.

Sabe-se que a rede elétrica possui distorção harmônica em virtude das cargas não lineares nela conectadas. Devido a este motivo, a malha de controle de harmônicas utiliza as harmônicas da tensão para gerar uma referência de corrente harmônica (I_h) e atenuar o conteúdo harmônico existente na tensão da rede.

A malha de tensão total de barramento utiliza os valores de tensão de cada capacitor do barramento (E_1, E_2) para gerar uma referência (I_{total}) que multiplica a referência em fase (ref_{ϕ}). Esta malha muda a referência de saída para a fonte de corrente (I_{CC}) conectada ao barramento quando energia ativa é solicitada no controle do valor eficaz da tensão no PCC. Esta fonte de corrente “simula” uma fonte de potência ativa que fornece corrente para o barramento.

A malha de tensão diferencial de barramento utiliza a diferença entre os valores de tensão de cada capacitor para gerar uma referência de corrente média (I_{diff}) que faz com que seja drenada ou injetada corrente média no barramento para que seja compensado qualquer desequilíbrio.

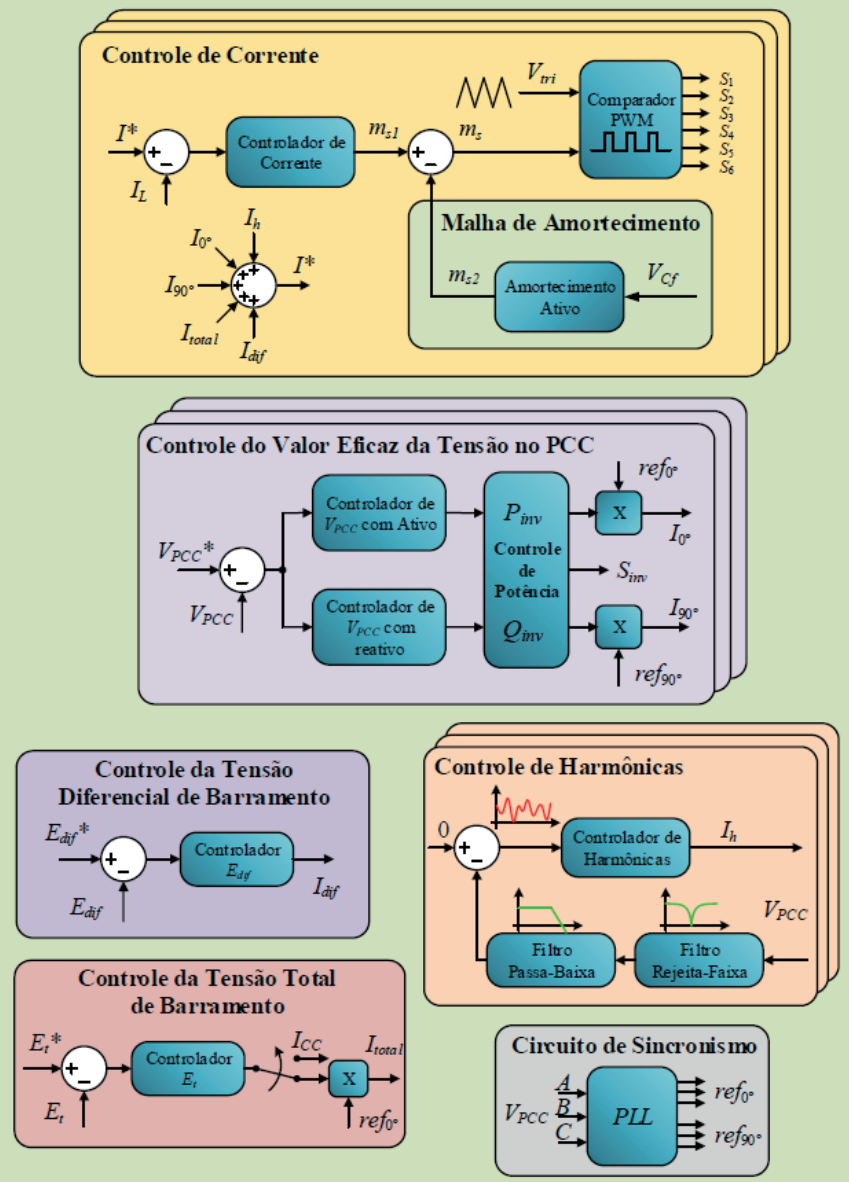
Figura 25 - Diagrama de potência e variáveis de controle do conversor.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 26 - Diagrama de blocos das malhas de controle do conversor.

Diagrama de Controle



Fonte: Produção do próprio autor.

3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Nesse capítulo é apresentada a estrutura de potência utilizada no conversor, sendo descritos os principais componentes e a estrutura do filtro de saída também é apresentada. Em função disso são obtidos os modelos dinâmicos de correntes e tensões que são fundamentais para o projeto do controle do conversor.

É apresentado o diagrama de potência completo que engloba as impedâncias da rede, cargas, estrutura de potência, sensores de tensão e corrente, PCC. O diagrama de controle também é apresentado, onde são mostradas todas as malhas de controle e suas referências, as conexões entre malhas e são mostradas as variáveis que são necessárias para que todo o sistema de controle funcione.

A obtenção dos modelos e definição das malhas de controle mostram que o sistema implementado é complexo e depende de diversos sistemas e malhas de controle para que funcione adequadamente.



4 PROJETO DO CONVERSOR

Neste capítulo são apresentadas as especificações de potência do projeto do conversor, dos componentes do filtro de saída e dos componentes do barramento cc. As características principais estão resumidas na Tabela 4. O sistema elétrico é trifásico a quatro fios, portanto, é equivalente a um sistema de três fases defasadas de 120° com ponto de neutro. O projeto da estrutura de potência não é o foco deste trabalho. Desta forma, a metodologia para os cálculos de esforços dos componentes e análise quantitativa pode ser encontrada em (DA CUNHA, 2015), para a mesma topologia utilizada.

Tabela 4 - Principais características de potência do conversor.

Especificações	Variáveis	Valores
Potência de saída trifásica	S_{inv}	10 kVA
Valor da tensão eficaz da rede elétrica	V_g	127 V
Número de fases/fios		3/4
Valor da tensão total do barramento	E	500 V
Frequência da rede	f_{rd}	60 Hz
Frequência de comutação	f_s	19980 Hz

Fonte: Produção do próprio autor.

A disponibilidade de um protótipo pré-montado no laboratório, direcionou as especificações para o conversor em questão.

4.1 Determinação dos Capacitores de Barramento

Para que o conversor tenha um fluxo de potência para rede elétrica é preciso impor uma tensão maior que o valor de pico da tensão da rede, de aproximadamente 180 V. Como a estrutura de potência utiliza metade de barramento em cada ciclo da rede a tensão total deve ser de no mínimo 360 V. Portanto, foi adotada uma tensão de 500 V como tensão total de barramento para que o índice de modulação não fique muito próximo da unidade.

Como o barramento cc deve se comportar como uma fonte de tensão constante, deseja-se que a ondulação de tensão sobre o nível médio nos capacitores seja a menor possível. O cálculo para a capacitância mínima equivalente total do banco de capacitores pode ser obtida pela eq. (36):

$$C_b = \frac{S_{inv} / 3}{2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot E \cdot \Delta E} \tag{36}$$

Considerando uma ondulação de 2 % do valor médio da tensão total obtém-se uma capacitância equivalente total de 1768 µF que resulta em uma capacitância $C_{01} = C_{02} = 3536 \mu\text{F}$ para cada metade do barramento. Considerando os parâmetros obtidos anteriormente optou-se utilizar o capacitor modelo B43586 do fabricante EPCOS, cujas características principais são apresentadas na Tabela 5.

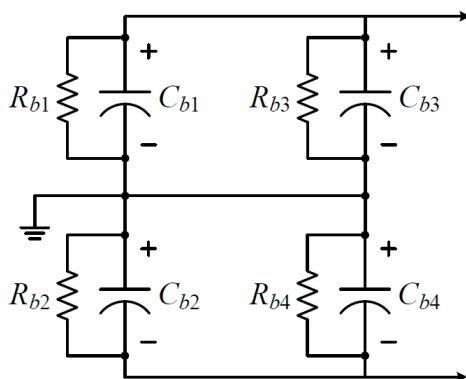
Tabela 5 - Parâmetros do capacitor de barramento (B43586).

Capacitor B43586	
C_R (20 °C - 100 Hz)	3300 µF
$I_{\sim \max}$ (40 °C - 100 Hz)	40 A
$I_{\sim \max}$ (85 °C - 100 Hz)	15 A
RSE_{\max} (20 °C - 100 Hz)	70 mΩ
U_R	450 VDC

Fonte: Datasheet do fabricante.

Foram associados dois capacitores em paralelo, para cada metade do barramento, resultando em uma capacitância de 6600 µF. Para equalização de tensão foram inseridas resistências de 22 kΩ/10 W em paralelo com cada capacitor, que também tem a função de descarregar qualquer tensão residual do barramento quando o conversor não está em operação. Na Figura 27 são apresentados os componentes do barramento.

Figura 27 - Capacitores de barramento com resistência de equalização.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 Determinação do Filtro de Saída

A conexão entre o conversor e a rede elétrica é realizada através de uma impedância que tem como objetivo filtrar os harmônicos de maior ordem deixando apenas as componentes desejadas. Essa impedância geralmente é composta por indutores e capacitores, arranjos de diversas formas. Podem ser utilizados filtros de primeira ordem, compostos por uma indutância em série com a rede. Comumente também são utilizados filtros de segunda ordem compostos por um indutor em série e um capacitor em paralelo com a rede. Ainda, são utilizados filtros de terceira ordem, onde um indutor em série, um capacitor em paralelo e mais um indutor em série compõe o filtro de saída (LISERRE; F.; A., 2004), (DANNEHL; FUCHS; HANSEN, 2007).

Neste trabalho será utilizado um filtro de terceira ordem, que apresenta uma maior atenuação dos harmônicos de alta frequência quando comparado aos filtros de primeira e segunda ordem. Além disso, quando dimensionados para uma mesma atenuação, os filtros de terceira ordem apresentam um menor custo e volume (PENA-ALZOLA *et al.*, 2014), (BUSADA; GOMEZ JORGE; SOLSONA, 2015). Apesar das vantagens citadas, o filtro de terceira ordem possui algumas desvantagens, entre elas a escolha dos componentes do filtro e a ressonância existente nos componentes do filtro que resulta em uma maior complexidade no controle de corrente (CHANNEGOWDA; JOHN, 2010), (WANG; BLAABJERG; LOH, 2014).

O projeto do filtro é baseado na metodologia proposta por (PENA-ALZOLA *et al.*, 2014). São apresentadas as principais etapas de cálculo do filtro LCL e as interpretações gráficas das equações.

Em geral, a frequência de ressonância deve estar entre a frequência de corte do controle da malha de corrente (f_{bw}) e a frequência de comutação (f_{sw}), conforme eq. (37):

$$f_{bw} \leq f_{res} \leq f_{sw} \quad (37)$$

A frequência de ressonância do filtro LCL pode ser obtida através da eq. (38):

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{C_f} \cdot \frac{L_A + L_a}{L_A L_a}} \quad (38)$$

A relação entre a frequência de comutação a e frequência de ressonância é definida pela eq. (39):

$$r_f = f_{sw} / f_{res} \quad (39)$$

A indutância total é definida como a soma de cada uma das indutâncias do filtro, dada pela eq. (40):

$$L_T = L_A + L_a \quad (40)$$

A relação entre a indutância do lado da rede (L_a) e a indutância do lado do conversor (L_A) é definida pela eq. (41):

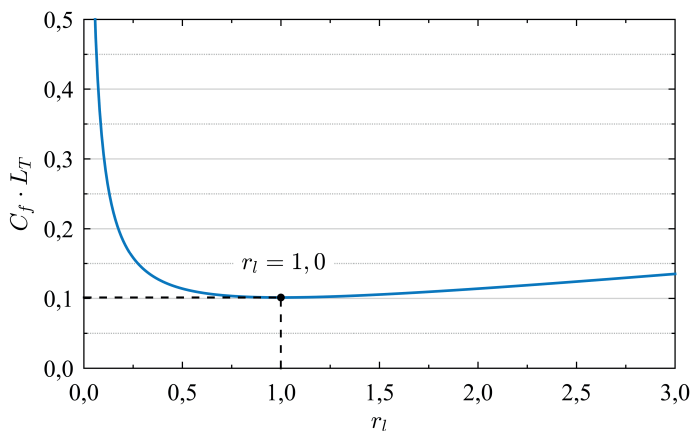
$$r_l = L_a / L_A \quad (41)$$

Utilizando a frequência de ressonância representada pela eq. (38) e substituindo pelo valor relacionado ao valor da indutância total e pela relação de indutâncias. Pode-se então obter a eq. (42) que relaciona a indutância total e a capacitância do filtro em função da frequência de comutação e as relações de frequência e indutância.

$$L_T C_f = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{r_f^2}{f_{sw}^2} \cdot \frac{(1+r_l)^2}{r_l} \quad (42)$$

Para analisar graficamente a eq. (42), foram arbitrados valores normalizados para as variáveis de frequência e suas relações, variando somente o valor da relação de indutâncias. Esta análise pode ser observada na Figura 28.

Figura 28 - Curva da variação do produto $L_f C_f$ em função do parâmetro de relação de indutâncias (r_l).



Fonte: Produção do próprio autor.

Algumas conclusões podem ser obtidas da equação e da figura anterior, entre elas:

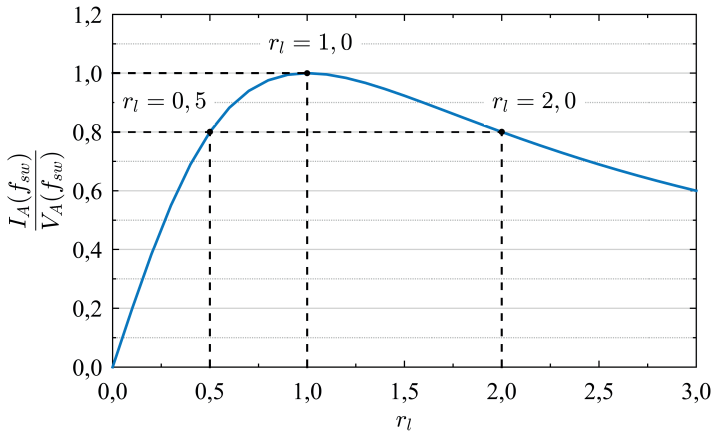
- O valor do produto $L_f C_f$ torna-se mínimo quando $r_l = 1$, isto resulta em uma indutância total mínima independentemente do valor da capacitância selecionada.
- Utilizar a indutância total mínima implica uma menor queda de tensão, logo em uma maior resposta dinâmica.
- Ainda, qualquer que seja escolha de L_f , a relação $r_l = 1$ resulta no menor valor de capacitância requerido, portanto em um menor consumo de energia reativa pelo filtro.

A atenuação do filtro na frequência de comutação pode ser obtida utilizando a função de transferência representada pela eq. (26). Substituindo pela indutância total e as relações de indutância e frequência, pode-se obter a eq. (43) que representa a atenuação do filtro na frequência de comutação.

$$\frac{I_A(f_{sw})}{V_A(f_{sw})} = 2\pi \cdot \frac{C_f f_{sw}}{r_f^2 (r_f^2 + 1)} \cdot \frac{r_l}{(1 + r_l^2)} \quad (43)$$

Para analisar graficamente a eq. (43) foram arbitrados valores normalizados para a relação de frequência e capacitância, variando somente o valor da relação de indutâncias, e analisando na frequência de comutação, o resultado pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 - Curva da variação da atenuação, na frequência de comutação, do filtro em função do parâmetro de relação de indutâncias (r_l).



Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da equação e da figura anteriores, conclui-se que para uma relação r_l unitária tem-se a menor atenuação na frequência de comutação. Para relações r_l entre 0,5 e 2,0 resulta em uma variação de 20% em relação a atenuação mínima, portanto tem-se uma maior atenuação para a relação entre indutâncias não unitária.

A relação entre a capacitância do filtro e a indutância total é definida pela eq. (44):

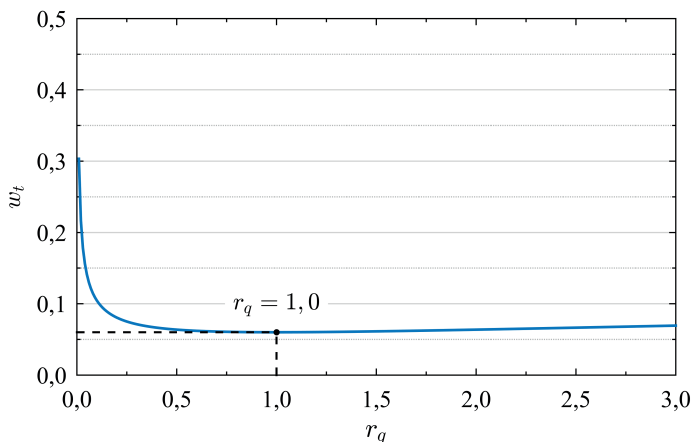
$$r_q = \frac{C_f}{L_T} \quad (44)$$

Considerando a energia armazenada no filtro em pu e substituindo a eq. (44) na eq. (42) tem-se:

$$w_t = \frac{3}{2} \cdot r_f \cdot \frac{f_{rd}}{f_{sw}} \cdot \frac{1+r_l}{\sqrt{r_l}} \cdot \frac{1+r_q}{\sqrt{r_q}} \quad (45)$$

Na análise gráfica da eq. (45) foram arbitrados valores para as constantes e somente sendo variada a relação de capacitância por indutância total (r_q), que pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 - Curva da variação da energia armazenada no filtro em função do parâmetro de relação de capacitância por indutância total (r_q).



Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da equação e figuras anteriores pode-se observar que ocorre a minimização da energia armazenada quando a relação r_q torna-se unitária. Porém, valores muito próximos de 1 podem levar a valores muito grandes para as indutâncias e muito pequenos para a capacitância.

O gráfico da Figura 30 mostra que para valores de $r_q > 1$ ocorre um leve aumento na energia armazenada, e para valores de $r_q < 1$ ocorre um maior acúmulo de energia no filtro.

Para se chegar nos valores finais do filtro de saída foram utilizadas interações de cálculo. Iniciando com os valores de r_q e r_l unitários e $r_f = 5,6$ chega-se a um valor de capacitância muito elevado e de impedância muito pequeno. Portanto, o parâmetro r_q é reduzido parâmetro r_l é incrementado até que se obtenham valores aceitáveis de capacitância e indutância. Após algumas interações chegou-se aos seguintes parâmetros:

$$\begin{aligned} r_q &= 0,1 \\ r_f &= 5,6 \\ r_l &= 1,8 \end{aligned} \quad (46)$$

Resultando em uma indutância total de $L_T = 1,583$ mH, com $L_a = 1,017$ mH e $L_A = 0,565$ mH com uma capacitância de $C_f = 5,48$ μ F.

A Tabela 6 resume os parâmetros de indutância, capacitância e frequência de ressonância obtidos teoricamente e experimentalmente.

Tabela 6 - Parâmetros teóricos e experimentais do filtro de saída.

Parâmetros	Teórico	Experimental
L_T	1,583 mH	1,560 mH
L_a	1,017 mH	1,000 mH
L_A	0,565 mH	0,560 mH
C_f	5,48 μ F	5,00 μ F
f_{res}	3,568 kHz	3,757 kHz

Fonte: Produção do próprio autor.

Utilizando os componentes disponíveis em laboratório pode-se aproximar dos valores teóricos projetados.

4.3 Determinação dos Interruptores

No protótipo foram escolhidos os módulos de IGBTs modelo SKM75GB063D do fabricante SEMIKRON. As principais características de potência dos IGBTs são apresentadas na Tabela 7 e as principais características dos diodos na Tabela 8.

Tabela 7 - Parâmetros dos IGBTs.

SKM75GB063D		
Parâmetros	Condições	Valores
V_{CES}	$T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	600 V
I_c	$T_j = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	100 A (75 A)
	$T_c = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (75 $^{\circ}\text{C}$)	
r_{CE}	$V_{GE} = 15\text{ V}$	14 m Ω (18,7 m Ω)
	$T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (125 $^{\circ}\text{C}$)	
$V_{CES(sat)}$	$V_{GE} = 15\text{ V}$ $I_{cnom} = 74\text{ A}$	2,1 V (2,4 V)
	$T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (125 $^{\circ}\text{C}$)	
$t_{d(on)}$	$R_G = 15\text{ }\Omega$	60 ns
t_r	$V_{cc} = 300\text{ V}$	50 ns
E_{on}	$I_c = 75\text{ A}$	3 mJ
$t_{d(off)}$	$T_j = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$	350 ns
t_f	$V_{GE} = \pm 15\text{ V}$	35 ns
E_{off}		2,5 mJ

Fonte: (SEMIKRON, 2007).

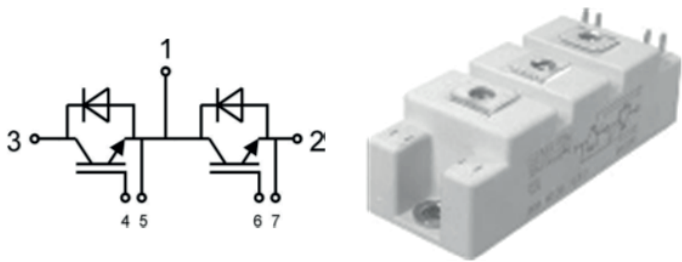
Tabela 8 - Parâmetros dos diodos.

SKM75GB063D		
Parâmetros	Condições	Valores
I_F	$T_J = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	75 A (50 A)
	$T_c = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (80 $^{\circ}\text{C}$)	
V_F	$I_{fom} = 74\text{ A}$ $V_{GE} = 0\text{ V}$	1,55 V (1,55 V)
	$T_c = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (125 $^{\circ}\text{C}$)	
r_F	$T_c = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$	10 m Ω
I_{RRM}	$I_F = 75\text{ A}$ $T_J = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$	30 A
	di/dt = 800 A/ μ s	
	$V_{GE} = \pm 15\text{ V}$	
Q_{rr}	$V_{CC} = 300\text{ V}$	3,7 μ C

Fonte: (SEMIKRON, 2007).

Cada módulo contém dois interruptores em série com diodos em antiparalelo. Na Figura 31 podem ser observados o arranjo elétrico e o módulo de potência. Os pontos 2 e 3 são conectados ao barramento cc, o ponto 1 é o ponto conectado no filtro de saída, os pontos 4, 5, 6 e 7 são referentes aos sinais de comando dos interruptores superiores e inferiores, respectivamente.

Figura 31 - Módulos de IGBTs utilizados no protótipo (SKM75GB063D).



Fonte: (SEMIKRON, 2007).

Os módulos de potência são fixados em um dissipador modelo P16/400 mm, do fabricante SEMIKRON, com ventilação forçada.

4.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo são apresentadas as especificações de potência do conversor. Foram determinadas as capacitâncias de barramento de acordo com a ondulação de tensão desejada. Também é definida a tensão total de barramento para um índice de modulação adequado. As especificações dos capacitores selecionados são apresentadas bem como as resistências de equalização.

A conexão do conversor com a rede é definida através de um filtro de terceira ordem, composto por duas indutâncias, com uma capacitância entre as mesmas. As relações de frequência e de indutância são utilizadas para se avaliar a indutância total e as relações de atenuação de harmônicos do filtro. As relações de capacitâncias são utilizadas para se avaliar a energia armazenada no filtro e definir o valor de capacitância necessário. Assim, são definidos os parâmetros do filtro de saída.

Por fim são apresentados os interruptores escolhidos com suas especificações de potência o dissipador utilizado.

Os cálculos dos esforços dos componentes e projeto da estrutura de potência não são o foco deste trabalho, porém as apresentações dos elementos utilizados são de grande importância para se entender o sistema em geral.



5 CONTROLE DIGITAL

Nesta seção são apresentados os projetos dos controladores que compõem o sistema, na forma digital, uma vez que o controle é implementado no DSC. Será utilizado o método de resposta em frequência no plano W . Para utilizar esta técnica são obtidas as funções de transferência no plano S contínuo e em seguida discretizadas para o plano Z . Por fim as funções são transportadas para o plano semi-contínuo denominado W , utilizando-se da transformada bilinear também conhecida como transformada de “Tustin” (OGATA, 1995). Utilizando esta metodologia de projeto são levados em conta os efeitos da discretização nos modelos das plantas obtidas.

Após o projeto dos controladores neste plano, levam-se as funções de transferência dos controladores novamente para o plano Z discreto, onde são representadas em equações de diferenças, as quais podem ser inseridas no processador digital de sinais. A avaliação dos controladores é efetuada através da resposta em frequência, utilizando diagramas de bode das funções de malha aberta, sendo avaliados os parâmetros da margem de fase, margem de ganho e frequência de cruzamento para que em malha fechada operem de forma adequada.

São apresentados os controladores do circuito de sincronismo, do amortecimento ativo, da corrente de saída em quadratura e em fase, do valor eficaz da tensão no PCC, do valor da tensão total e diferencial de barramento.

5.1 MODULADOR PWM

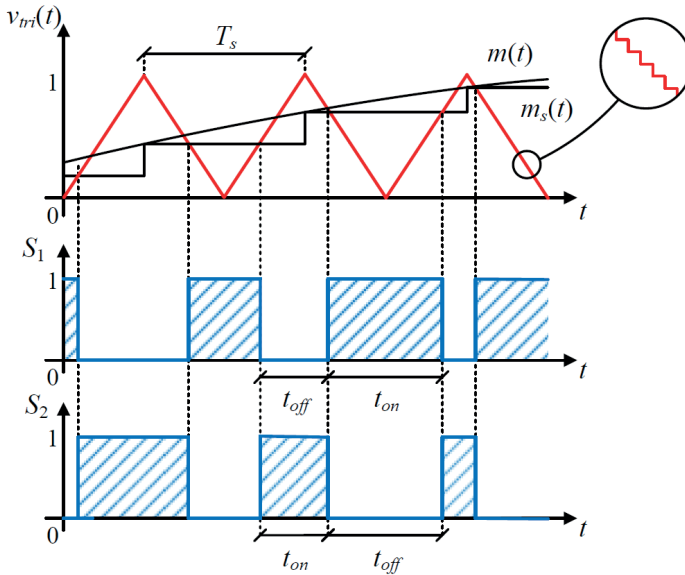
Os sinais provenientes dos controladores devem ser convertidos em pulsos de comando para que os interruptores operem da forma desejada. Para isto são utilizados circuitos moduladores PWM que consistem em um sinal de referência comparado a uma portadora triangular que gera os pulsos de acordo com a razão cíclica definida.

Como o circuito de geração dos pulsos é digital e é realizado internamente ao DSC o seu funcionamento difere de um modulador inteiramente analógico. O sinal de comparação é amostrado no pico da portadora e mantido fixo até o próximo pico, onde é atualizado. Esta característica insere um atraso digital de uma amostra, que deve ser considerado no modelo do modulador (BUSO; MATTAVELLI, 2006).

Como é utilizada a simples atualização neste trabalho, a frequência de comutação é igual a frequência de amostragem ($T_{sw} = T_s$).

Na Figura 32 pode-se observar o sinal de referência analógico $m(t)$, o sinal digital $m_s(t)$ e o sinal da portadora $V_{tri}(t)$, além dos efeitos do atraso quando ocorre a comparação com a portadora. Os intervalos t_{off} e t_{on} são complementares entre os interruptores S_1 e S_2 .

Figura 32 - Comutação complementar digital com sincronização e atualização no pico da portadora.



Fonte: Baseado em (BUSO; MATTAVELLI, 2006).

Portanto o modelo digital para o modulador PWM é mostrado na eq. (47), que consiste na função de transferência que representa a dinâmica do sinal de controle pela razão cíclica.

$$G_{PWM}(z) = \left(\frac{1}{V_{tri}} \right) \cdot \left(\frac{1}{z} \right), \quad (47)$$

onde V_{tri} é o valor de pico a pico da portadora em conjunto com o atraso inserido pela característica da modulação digital.

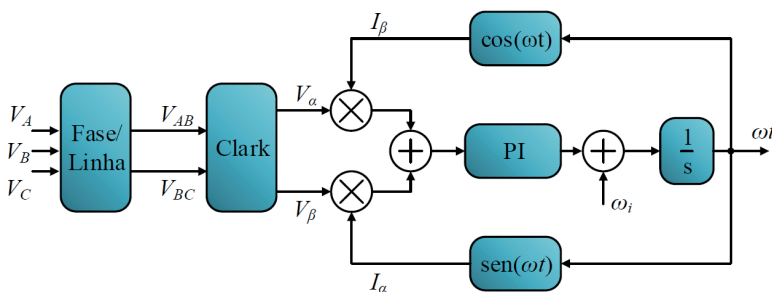
5.2 CIRCUITO DE SINCRONISMO

O sistema de controle utiliza sinais de referência sincronizados com a rede elétrica e para que seja possível se obter estes sinais foram escolhidos circuitos de sincronismo do tipo *Phase Locked Loop* (PLL). Os circuitos PLL utilizam sinais da rede elétrica como entrada para que em malha fechada produzam sinais de saída com frequência e fase relacionados com os sinais de entrada.

Neste trabalho é utilizado o circuito *q-PLL*, que fornece uma referência em fase com o sinal de entrada. A malha do *q-PLL* utiliza a potência imaginária instantânea comparada a uma referência nula, quando o sinal entra em sincronia a potência imaginária na entrada trona-se nula (ORTMANN, 2008). Este circuito apresenta um tempo de sincronia reduzido comparado a circuitos de sincronismo monofásicos, pois utilizam as informações das três fases para compor a potência imaginária. Ainda, possuem boa capacidade na rejeição de ruídos e ondulações, e ainda ter um desempenho transitório rápido. Outra vantagem é a possibilidade de inserir uma condição inicial, acelerando o processo de sincronismo.

A Figura 33 mostra o diagrama de blocos do circuito do *q-PLL*, onde são observados os blocos de conversão da tensão de fase para tensão de linha, a transformada de Clark, o bloco de controle PI, a condição inicial (ω_i) e o bloco integrador.

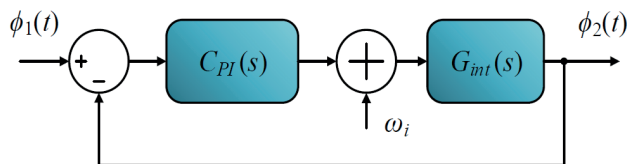
Figura 33 - Circuito de sincronismo *q-PLL* com condição inicial.



Fonte: Baseado em (ORTMANN, 2008).

O modelo linearizado do diagrama é mostrado na Figura 34. Pode-se então projetar o controlador PI para que tenha o desempenho desejado na frequência de interesse. A condição inicial é definida no valor fixo, uma vez que a frequência a ser rastreada é conhecida, no caso 60 Hz.

Figura 34 - Circuito simplificado de sincronismo q -PLL com condição inicial.



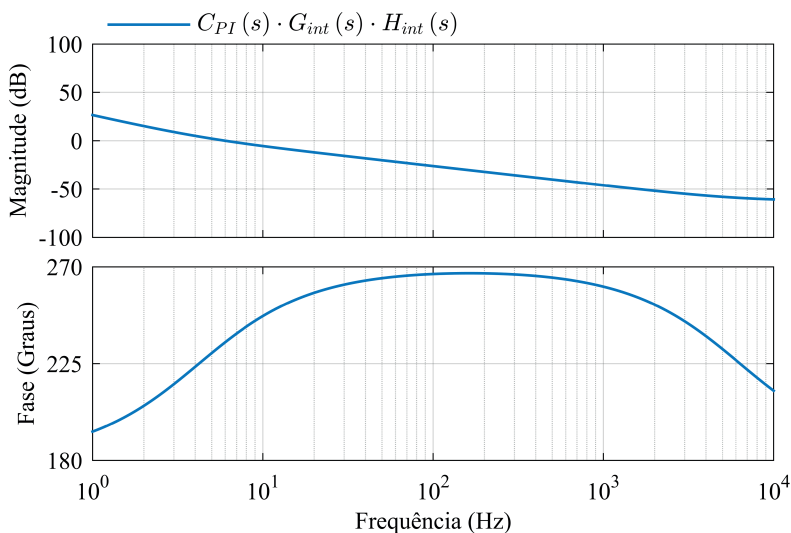
Fonte: Baseado em (ORTMANN, 2008).

O controlador PI ($C_{pi}(s)$) foi projetado para que a curva de ganho da função de transferência de malha aberta tenha uma frequência de cruzamento por zero de 12 Hz, e uma margem de fase de 55°. Assim, o controlador possui uma boa resposta mesmo sobre perturbações de maior frequência, mostrado na eq. (48).

$$C_{PI}(z) = 61,844317 \cdot \frac{(z - 0,997361)}{(z - 1)} \quad (48)$$

O diagrama de bode para o controlador obtido é mostrado na Figura 35. Pode-se verificar que a frequência de cruzamento por zero e a margem de fase estão dentro dos requisitos de projeto.

Figura 35 - Gráficos de magnitude e fase do diagrama de bode para o controlador do circuito de sincronismo.



Fonte: Produção do próprio autor.

A utilização deste circuito fornece uma referência em fase com o sinal de entrada. Portanto, para as demais fases são gerados os sinais em fase e quadratura em função do sinal sincronizado adicionando-se $\pm 120^\circ$ em suas referências.

5.3 PROJETO DOS CONTROLADORES

Nesta seção são apresentados os projetos dos controladores que compõem toda a estrutura de controle, desde as malhas de corrente e amortecimento até as malhas do valor eficaz da tensão no PCC, valor total e diferencial da tensão de barramento e harmônicas de corrente.

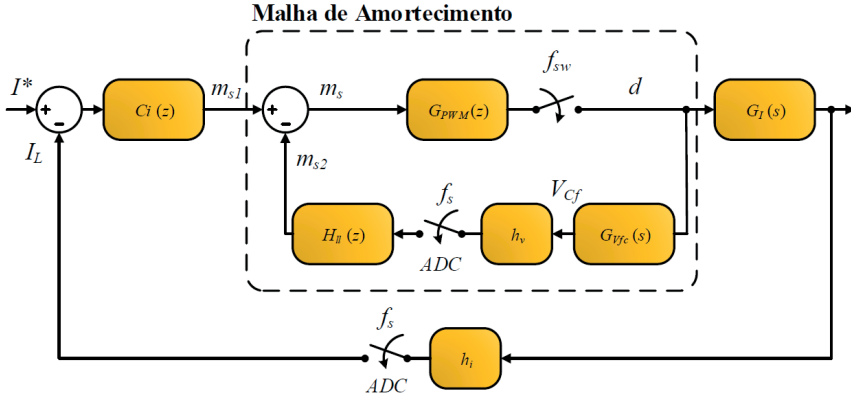
5.3.1 Controlador de Amortecimento Ativo

O amortecimento faz-se necessário pois existe um ponto de ressonância que pode levar o sistema a instabilidade. Existem técnicas de amortecimento passivas ou ativas para atenuação da ressonância do filtro. Entre as técnicas passivas, a inclusão de um resistor em série com o capacitor é uma opção, porém, esta técnica insere perdas adicionais e que em potências elevadas podem inviabilizar o sistema. Entre as técnicas ativas existem diversas soluções propostas na literatura. São utilizados filtros *notch* na malha direta de controle, realimentação de estados, utilização de um resistor virtual e também malhas de realimentação baseadas na corrente ou na tensão do capacitor de filtro (PENA-ALZOLA *et al.*, 2014), (TANG *et al.*, 2012), (WU; LEHN, 2006), (MALINOWSKI; KAZMIERKOWSKI; BERNET, 2005), (BAO *et al.*, 2014), (BLASKO; KAURA, 1997), (DANNEHL; LISERRE; FUCHS, 2011).

Neste trabalho é utilizada a técnica de amortecimento ativo que utiliza a leitura do valor de tensão sobre o capacitor do filtro juntamente com um controlador *lead-lag* para gerar uma ação de controle que é subtraída da ação de controle do controlador de corrente, resultando em um sistema estável. O projeto da malha de amortecimento é baseado em (PENA-ALZOLA *et al.*, 2014). São mostradas as principais equações e procedimentos de cálculo para este tipo de técnica utilizada.

Na Figura 36 é mostrado o diagrama de blocos que representa a malha de amortecimento ativo. Esta é uma malha interna à malha de controle de corrente.

Figura 36 - Representação em diagrama de blocos da malha de amortecimento.



Fonte: Produção do próprio autor.

Nesta técnica é utilizada a corrente do capacitor do filtro para a malha de amortecimento, necessitando sensores de corrente adicionais. Para tornar-se vantajoso economicamente são utilizadas as tensões dos capacitores, por meio de sensores de tensão não isolados. São utilizados divisores resistivos, que possuem baixo custo e fácil acesso.

Idealmente, se a tensão no capacitor for derivada obtém-se a corrente do capacitor, porém isto implicaria em elevados ganhos em altas frequências, tornando-se um problema para o controle. Portanto é utilizado um controlador *lead-lag* que, devidamente projetado, atua como derivador somente em uma faixa de frequência selecionada. Quando a malha de amortecimento é realimentada, o sistema atua como se fosse um filtro *notch* sintonizado na frequência de ressonância do sistema.

A função de transferência no plano W do controlador é definida pela eq. (49):

$$C_{II}(w) = k_d C_f \omega_{max} \left(\frac{w + \omega_{max}}{k_f w + \omega_{max}} \right), \quad (49)$$

onde k_d é o ganho do controlador, ω_{max} é a frequência onde se obtém o máximo ângulo de avanço e C_f é a capacitância do filtro.

A utilização do controle digital insere um atraso na malha de controle, portanto, este atraso deve ser levado em consideração na malha de amortecimento. O cálculo do ângulo máximo (ϕ_{max}) é representado pela eq. (50):

$$\phi_{max} = 90^\circ + T_s \omega_{res} \frac{360^\circ}{2\pi} \quad (50)$$

O parâmetro k_f deve ser maior que zero e menor que um, para manter a característica de avanço do controlador, sendo definido pela eq. (51).

$$k_f = \sqrt{\frac{1 - \text{sen}(\varphi_{\max})}{1 + \text{sen}(\varphi_{\max})}} \quad (51)$$

Agora, aplicando os valores para o filtro projetado neste trabalho, obtêm-se os seguintes parâmetros de frequência de ressonância, ângulo máximo de avanço e os ganhos, mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de controle da malha de amortecimento ativo.

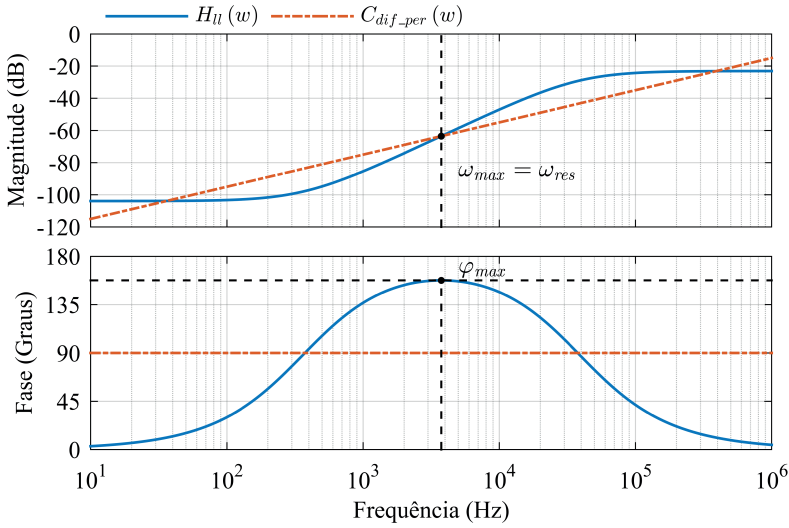
Parâmetros	Valores
$\omega_{\max} = \omega_{\text{res}}$	3,757 kHz
ϕ_{\max}	157,7º
k_f	0,097664
k_d	0,005661

Fonte: Produção do próprio autor.

O ganho k_d não deve atingir valores muitos altos com o risco de tornar o sistema de amortecimento instável, segundo (PENA-ALZOLA *et al.*, 2014) e (LISERRE; DELL'AQUILA; BLAABJERG, 2002).

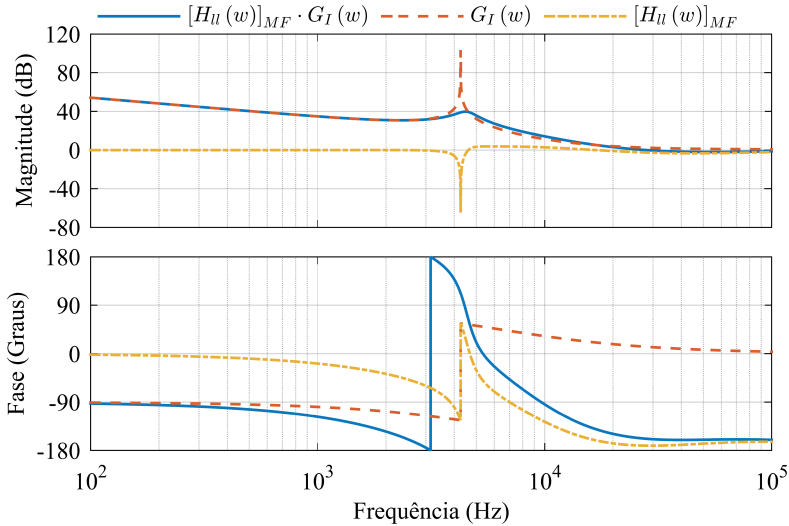
Na Figura 37 pode-se observar os gráficos de magnitude e fase para o diagrama de bode do controlador obtido. Também pode-se observar que são inseridas as curvas de um diferenciador ideal ($C_{\text{dif_per}}$) para comparação.

Figura 37 - Gráficos de magnitude e fase do diagrama de bode do controlador *lead-lag* e de um diferenciador ideal.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 38 - Diagrama de bode do controlador de amortecimento malha fechada com a planta de corrente, a planta de corrente e o controlador.



Fonte: Produção do próprio autor.

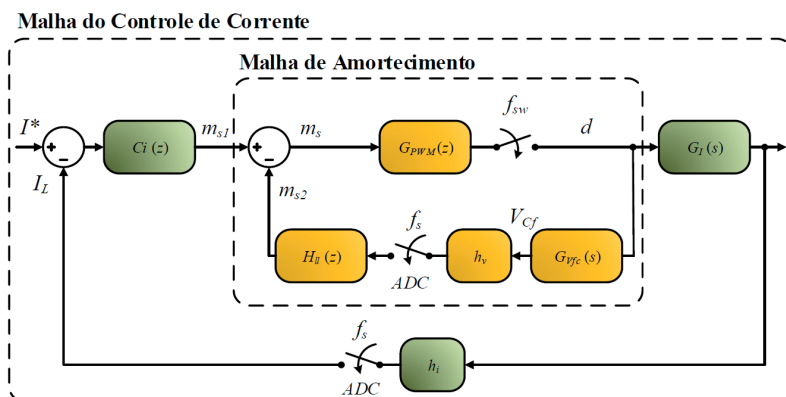
Como o ângulo obtido para o controlador é maior que 90° , foram utilizados dois controladores em cascata ($H_{II}(w)$), cada um com a metade do ângulo necessário para se atingir o valor total calculado.

Na Figura 38 pode-se observar o controlador da malha de amortecimento ativo em malha fechada com a planta de corrente e o pico de ressonância atenuado.

5.3.2 Controlador da Corrente de Saída

A malha de controle da corrente considera a malha fechada do amortecimento ativo na malha direta de controle. Na Figura 39 é mostrado a malha de controle de corrente e a malha interna de amortecimento ativo. A partir da planta de corrente são lidas e amostradas as correntes através do sensor (h_i) e do conversor analógico-digital.

Figura 39 - Representação em diagrama de blocos da malha de controle de corrente com a malha interna de amortecimento ativo.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para o controlador de corrente foi escolhido o controlador proporcional mais controladores ressonantes, pois deseja-se rastrear referências senoidais na frequência fundamental e alguns de seus múltiplos.

A estrutura do controle ressonante utilizada não possui ganho infinito na frequência de ressonância, entretanto possui alto ganho nesta frequência sendo adequados para o rastreamento de referências senoidais. Os parâmetros de ajuste deste controlador são o ganho proporcional K_p , o ganho proporcional de cada parcela ressonante K_{ih} , a frequência de corte das bandas laterais ω_c e a própria frequência de ressonância ω_h de cada parcela. A estrutura de controle é apresentada pela eq. (52).

$$C_{PR}(w) = K_p + \sum_{h=1,3,5,7,9} K_{ih} \cdot \frac{(2 \cdot \omega_c)w}{w^2 + (2 \cdot \omega_c)w + \omega_h^2} \tag{52}$$

Os parâmetros de controle obtidos para os controladores ressonantes e o ganho proporcional para a planta em estudo podem ser observados na Tabela 10. Podem ser observadas as frequências de ressonância sendo a 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem como as escolhidas para compensação. A frequência de corte foi a mesma escolhida para cada parcela, definida em 0,5 % da frequência fundamental. E os ganhos de cada parcela deve ser menor que o ganho da parcela anterior.

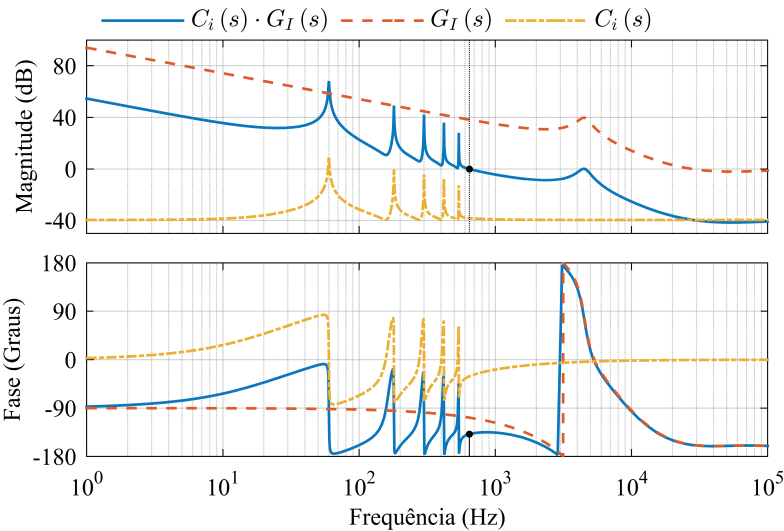
Tabela 10 - Parâmetros de controle da malha de controle de corrente.

Parâmetros	Valores por harmônica da fundamental				
	1	3	5	7	9
ω_h (rad)	$(2\pi)60$	$(2\pi)180$	$(2\pi)300$	$(2\pi)420$	$(2\pi)540$
ω_c (rad)	$(2\pi)0,3$				
K_{ih}	3,00	1,00	0,75	0,50	0,25
K_p	0,010500				

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 40 apresenta os diagramas de bode da malha de controle para o controlador e a planta, o controlador e a planta de corrente.

Figura 40 - Diagramas de bode do controlador de corrente com a planta de corrente, a planta de corrente com amortecimento e o controlador de corrente.



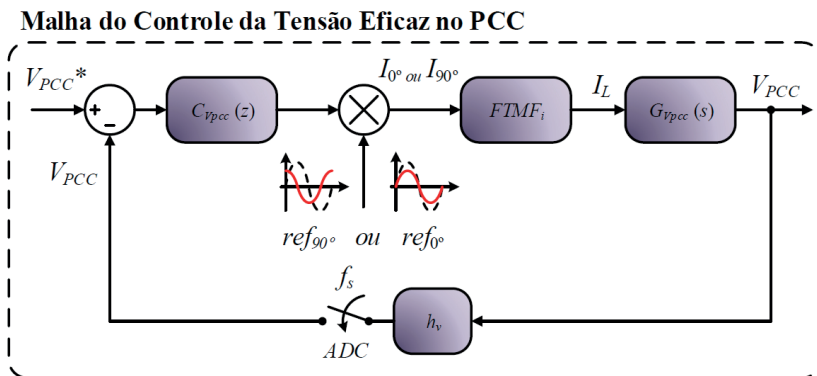
Fonte: Produção do próprio autor.

Foram obtidos os parâmetros a partir do diagrama de bode, com frequência de cruzamento por zero de 645 Hz e margem de fase de 41,5°. Como o controlador possui controladores ressonantes nas frequências de interesse não houveram problemas devido a frequência de corte um pouco abaixo do usualmente utilizado para controladores de corrente.

5.3.3 Controlador do Valor Eficaz da Tensão no PCC

A malha de controle do valor eficaz da tensão no PCC é mostrada na Figura 45. Esta é uma malha externa à malha de controle de corrente que no diagrama é representada por $FTMF_i$. Em virtude do desacoplamento entre malhas, esta malha possui uma característica mais lenta comparada à malha de corrente.

Figura 41 - Representação em diagrama de blocos da malha de controle da tensão eficaz no PCC para referência em fase e quadratura.



Fonte: Produção do próprio autor.

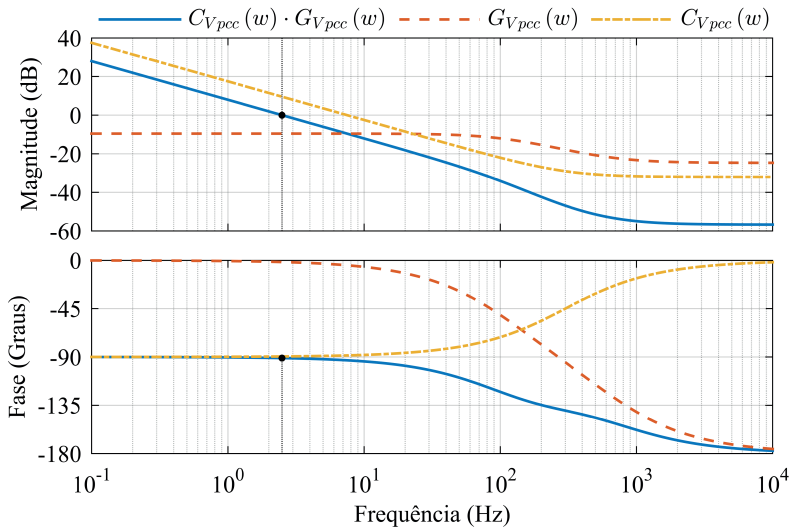
São utilizadas duas malhas semelhantes para multiplicar as referências provenientes da malha do PLL, uma para referência em fase e outra para referência em quadratura.

Para o controlador foi utilizada uma estrutura do tipo PI composta por um polo na origem e um zero, representado pela eq. (53).

$$C_{vpcc}(w) = K_{vpcc} \cdot \frac{w + Z_{vpcc}}{w} \quad (53)$$

Os parâmetros de controle obtidos para a planta em estudo foram um zero posicionado em 300 Hz e uma frequência de cruzamento por zero de 2,5 Hz. O diagrama de bode para a malha de controle pode ser observado na Figura 42.

Figura 42 - Diagramas de bode do controlador de tensão eficaz no PCC, planta de tensão eficaz no PCC e planta mais controlador.



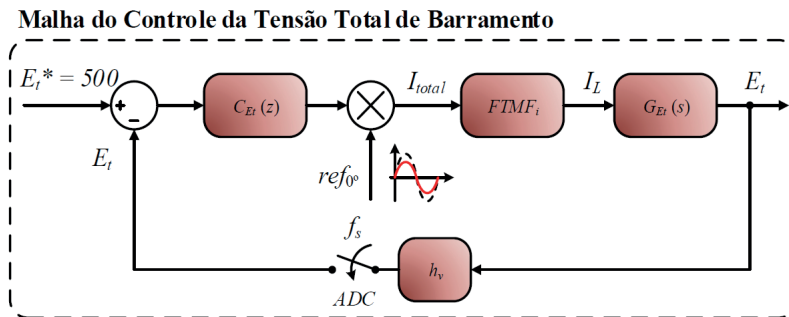
Fonte: Produção do próprio autor.

Foram obtidos os parâmetros a partir do diagrama de bode, com frequência de cruzamento por zero de 2,5 Hz e margem de fase de 89°, conforme especificação de projeto.

5.3.4 Controlador de Tensão Total de Barramento

A malha de tensão total de barramento é mostrada na Figura 43. Esta também é uma malha externa à malha de corrente que é representada por $FTMF_r$. As tensões de barramento são lidas e amostradas pelo sensor h_v e pelo ADC, respectivamente.

Figura 43 - Representação em diagrama de blocos da malha de controle da tensão total de barramento.



Fonte: Produção do próprio autor.

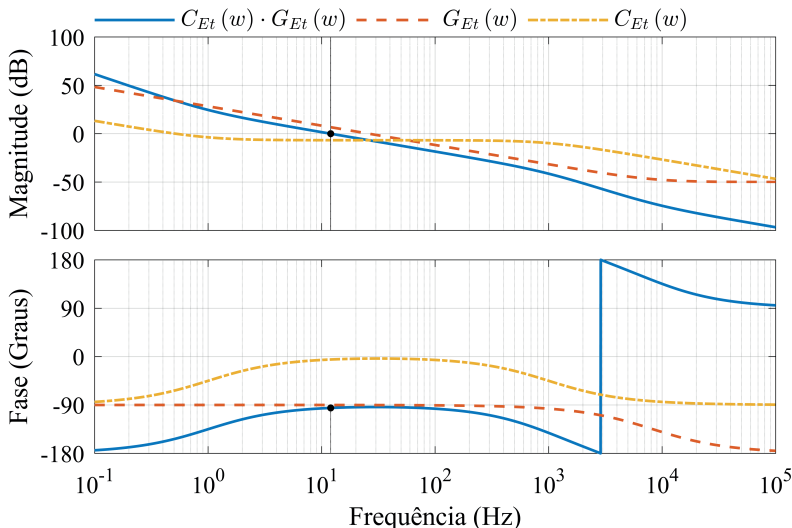
Nesta malha o controlador gera uma referência que multiplicada pelo componente de referência em fase que faz com que o barramento absorva ou entregue energia, elevando ou reduzindo o valor da tensão média total.

Para o controlador foi utilizado uma estrutura do tipo PI composta por um polo na origem, um zero e mais um polo em alta frequência, representado pela eq. (54)

$$C_{Et}(w) = K_{Et} \cdot \frac{w + Z_{Et}}{w(w + P_{Et})} \quad (54)$$

Os parâmetros de controle obtidos para a planta em estudo foram um zero posicionado em 1 Hz, o polo posicionado em 1 kHz e frequência de cruzamento por zero de 12 Hz. O diagrama de bode para a malha de controle pode ser observado na Figura 44.

Figura 44 - Diagramas de bode do controlador de tensão total de barramento, planta de tensão total de barramento e planta mais controlador.



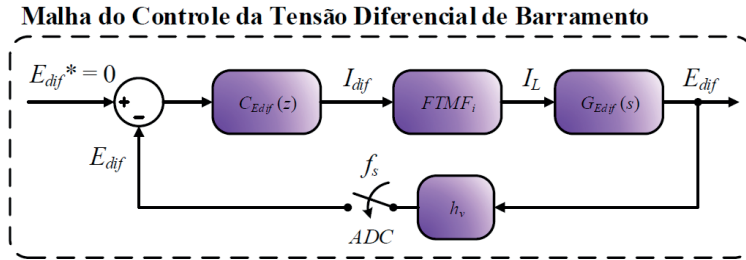
Fonte: Produção do próprio autor.

Foram obtidos os parâmetros a partir do diagrama de bode, com frequência de cruzamento por zero de 12 Hz e margem de fase de 85°, conforme especificado.

5.3.5 Controlador de Tensão Diferencial de Barramento

A malha de tensão diferencial de barramento é mostrada na Figura 45. Nesta malha o controlador gera uma ação de controle cc que é somada às referências senoidais. Isto faz com que seja drenada energia desigual do barramento para a regulação da tensão diferencial de barramento. Como deseja-se que não haja desequilíbrio entre os capacitores a tensão de referência é mantida em zero.

Figura 45 - Representação em diagrama de blocos da malha de controle da tensão diferencial de barramento.



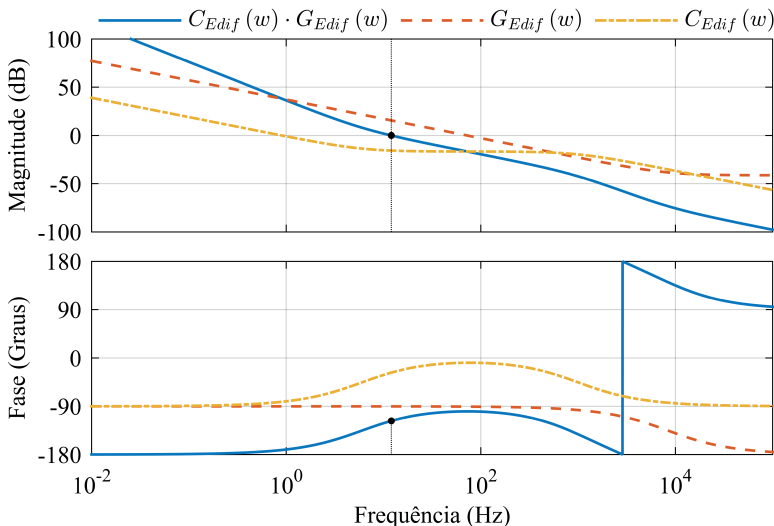
Fonte: Produção do próprio autor.

Para o controlador foi utilizada uma estrutura do tipo PI composta por um polo na origem, um zero e mais um polo em alta frequência, representado pela eq. (55)

$$C_{Edif}(w) = K_{Edif} \cdot \frac{w + Z_{Edif}}{w(w + P_{Edif})} \quad (55)$$

Os parâmetros de controle obtidos para a planta em estudo foram um zero posicionado em 6 Hz, o polo posicionado em 1 kHz e frequência de cruzamento por zero de 12 Hz. O diagrama de bode para a malha de controle pode ser observado na Figura 46. Observa-se que o valor da fase sofre uma inversão de -180° para 180° , sendo esta uma representação cíclica equivalente à representação de 0° a 360° .

Figura 46 - Diagramas de bode do controlador de tensão diferencial de barramento, planta de tensão diferencial de barramento e planta mais controlador.



Fonte: Produção do próprio autor.

Foram obtidos os parâmetros a partir do diagrama de bode, com frequência de cruzamento por zero de 12 Hz e margem de fase de 62,6°, conforme especificado.

5.3.6 Controlador de Harmônicas

A malha de controle de harmônicas é mostrada na Figura 47. Nesta malha a tensão no PCC é lida e as correntes harmônicas são estimadas dividindo-se pela impedância equivalente na frequência de interesse. Nesta técnica o conversor comporta-se como uma pequena impedância para as harmônicas selecionadas, fazendo a corrente harmônica circular pelo conversor. A atenuação depende do valor ajustado para Z_h , que é definido de acordo com a capacidade do conversor, da intensidade de atenuação desejada e da estabilidade do sistema (HE; LI; MUNIR, 2012) (LI; HE, 2014). A escolha desta técnica possibilita a compensação sem a leitura efetiva da corrente, evitando o uso de medições ou comunicação remota das correntes de carga e da rede.

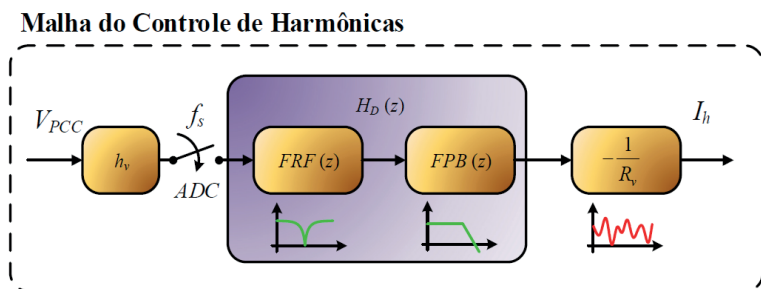
Portanto, a equação que define o valor da corrente que é injetada na rede para compensação de harmônicos é mostrada na eq. (56):

$$I_h = -H_D(s) \cdot \frac{V_{PCC}}{R_v} \quad (56)$$

onde $H_D(s)$ é a função de transferência de leitura das harmônicas de tensão, V_{PCC} é a tensão no PCC e R_v é o parâmetro de ajuste do controle.

O ajuste pode variar de zero a ∞ , sendo que zero produz a maior compensação e ∞ não produz nenhuma regulação. Também podem ser usados controladores para se buscar a melhor regulação de harmônicas. A Figura 47 mostra a representação em diagrama de blocos da malha de controle de harmônicas de tensão.

Figura 47 - Representação em diagrama de blocos da malha de controle das harmônicas de tensão no PCC.



Fonte: Produção do próprio autor.

Neste trabalho foram avaliadas as impedâncias em cada harmônica selecionada e foi definido um valor padrão que atendesse as condições de projeto, uma vez que é utilizada uma única malha para todas as harmônicas. A eq. (57) mostra o cálculo da impedância.

$$Z_h = R + j\omega_h L$$

$$V_h = |Z_h| \cdot I_h \quad \therefore \quad I_h = V_h \cdot \left(\frac{1}{|Z_h|} \right) \quad (57)$$

Para que seja obtido o valor da corrente correspondente ao valor da harmônica de tensão, é utilizado o parâmetro $R_v = |Z_h|$.

A Tabela 11 mostra os valores das impedâncias nas frequências de interesse múltiplas da fundamental, ou seja 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem e o parâmetro de ajuste selecionado para o controle.

Tabela 11 - Impedância equivalente para harmônicas da frequência fundamental e parâmetro de ajuste do controle.

Ordem da Harmônica (n)	$ Z_h $	$1/ Z_h $	R_v	$1/R_v$
3	1,170	0,855	2,849	0,351
5	1,694	0,590		
7	2,262	0,442		
9	2,849	0,351		

Fonte: Produção do próprio autor.

Foi escolhido o maior valor de R_v , como apenas uma malha é utilizada para atuar em todas as componentes, isso faz com que a compensação não exceda o limite em nenhuma das frequências.

Foram utilizados filtros para adequação do sinal de tensão. Primeiro o sinal é passado por um filtro rejeita-faixa (*FRF*), centrado em 60 Hz com frequência de corte lateral (f_b) de 10 Hz e ganho unitário, para remover a componente fundamental do sinal. Em seguida o sinal é passado por um filtro passa-baixa (*FPB*) de primeira ordem, com frequência de corte (f_c) de 6 kHz e ganho unitário, para remover as componentes de maior frequência. As funções de transferências são mostradas nas eq. (58) e eq. (59).

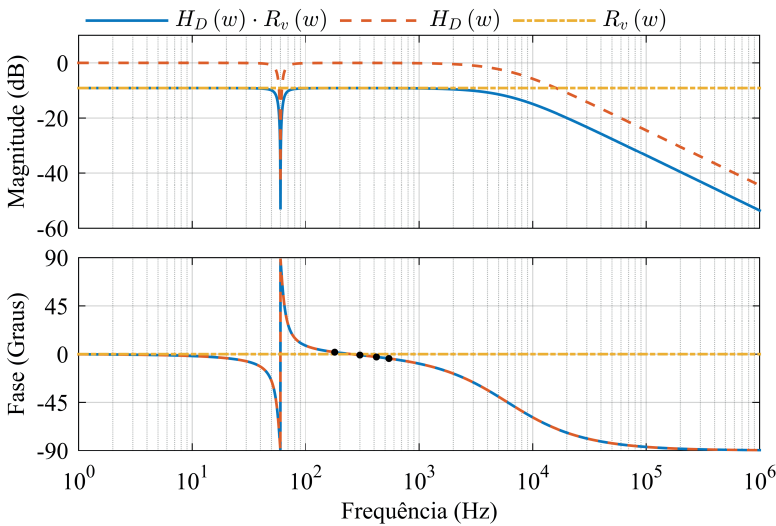
$$FRF(s) = k \cdot \frac{s^2 + (2\pi f_c)^2}{s^2 + (2\pi f_b)s + (2\pi f_c)^2} \quad (58)$$

$$FPB(s) = k \cdot \frac{2\pi f_c}{s + 2\pi f_c} \quad (59)$$

Os filtros são implementados digitalmente utilizando frequência igual à de amostragem.

A Figura 48 mostra o diagrama de bode para o controlador de harmônicas e o fator de regulação da malha. São destacados os ângulos de fase nas frequências de interesse.

Figura 48 - Diagramas de bode do controlador de harmônicas, planta de tensão no PCC e planta mais controlador.



Fonte: Produção do próprio autor.

A utilização de filtros para condicionar o sinal de tensão pode inserir distorções na fase do sinal. Se forem inseridos sinais com distorções de fase muito acentuadas pode-se levar o sistema a instabilidade.

Na Tabela 12 são mostrados os ângulos dos sinais após condicionamento do sinal para a malha de controle de harmônicas.

Tabela 12 - Ângulos da malha de controle de harmônicas da tensão em cada harmônica.

Ordem da Harmônica (n)	Atenuação	Fase (Graus)
3	0,35 (-9,119 dB)	+1,86°
5		-0,88°
7		-2,61°
9		-4,07°

Fonte: Produção do próprio autor.

Neste caso a fase dos ângulos obtidos nas harmônicas após o condicionamento de interesse não foram suficientes para prejudicar o controle.

5.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para o projeto dos controladores e os detalhes da implementação digital. As características do modulador digital e os efeitos da atualização existente são discutidos e inseridos nos modelos. O circuito de sincronismo é apresentado e seu controle projetado para seguir a referência senoidal conhecida. O controlador do amortecimento ativo é apresentado e sintonizado para que forneça a atenuação necessária, sendo possível projetar o controle de corrente sem a influência da ressonância. O processo de sintonia é complexo e exigiu algumas interações até o completo funcionamento da malha. Os controladores ressonantes utilizados no controlador de corrente são projetados para que se obtivesse o melhor desempenho. Nas outras malhas de controle são utilizados controladores do tipo PI, os quais mostraram-se adequados para desempenhar os requisitos solicitados. Para a eliminação ponderada de harmônicos foi utilizado um ganho proporcional que fosse adequado em todas as harmônicas, uma vez que somente um controlador foi especificado para toda a compensação. Existem outras técnicas mais eficientes na eliminação de harmônicos, porém essas técnicas demandam maior capacidade de processamento e maior complexidade no projeto. Todas os controladores são analisados no domínio da frequência por diagramas de bode, sendo avaliadas as frequências de cruzamento por zero e as margens de fase.



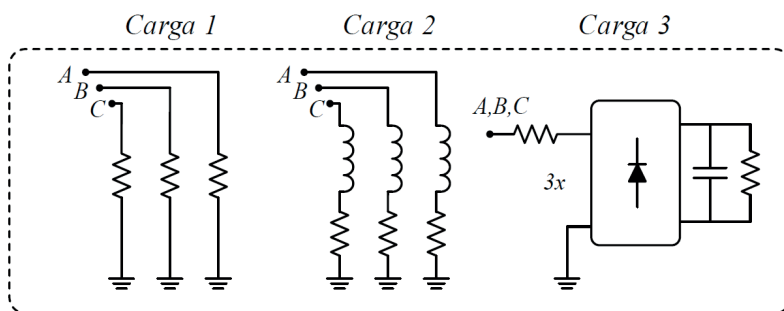
6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A validação das estratégias de compensação e das malhas de controle apresentadas nos capítulos anteriores foram efetuadas por meio de simulação numérica. As estruturas de potência e de controle são apresentadas e validadas, assim como são apresentadas cargas puramente resistivas, resistivas-indutivas e cargas não lineares, além de apresentar os resultados dinâmicos para degraus de cargas. Como buscou-se aproximar da aplicação prática também foram inseridas distorções presentes na rede elétrica, além de toda implementação digital semelhante ao *DSC*, com os atrasos de atualização e amostragem dos sinais.

6.1 DEFINIÇÃO DAS CARGAS

Foram definidas diferentes cargas para validar o sistema, pois com diferentes potências são avaliados diversos pontos de operação e diferentes condições de funcionamento de todo o sistema. A Figura 49 mostra as diferentes cargas selecionadas para a simulação do sistema.

Figura 49 - Cargas resistivas, indutivas e não lineares utilizadas na validação do sistema por simulação numérica.



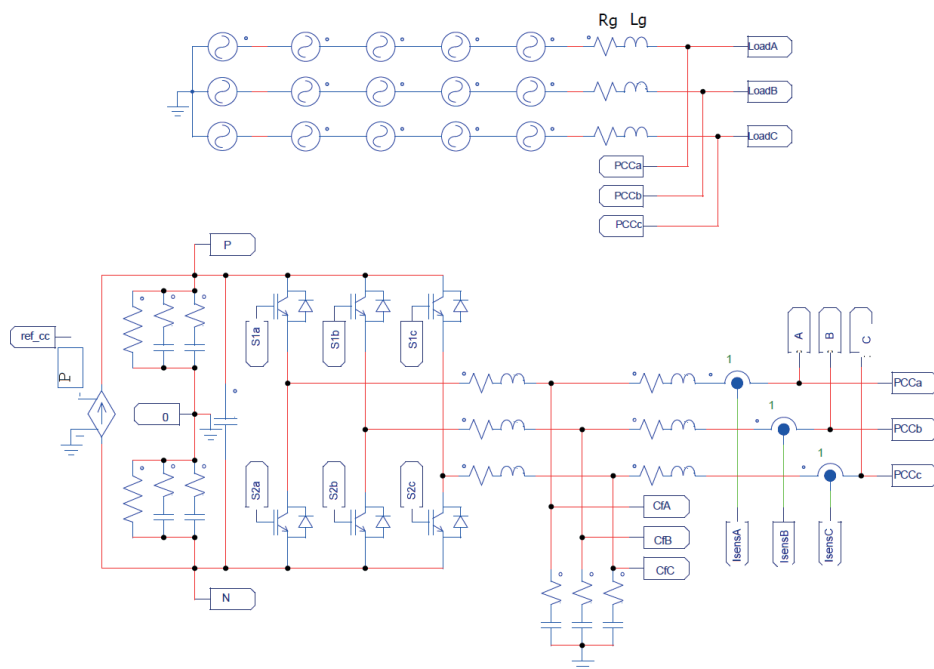
Fonte: Produção do próprio autor.

Foram utilizadas cargas trifásicas conectas em estrela com ponto neutro aterrado, fazendo com que o sistema se comporte como três circuitos monofásicos. Foram utilizadas cargas equilibradas e desequilibradas, além das cargas não lineares também equilibradas e desequilibradas, retificadores monofásicos com filtro capacitivo e com impedância de entrada.

6.2 CIRCUITO DE SIMULAÇÃO

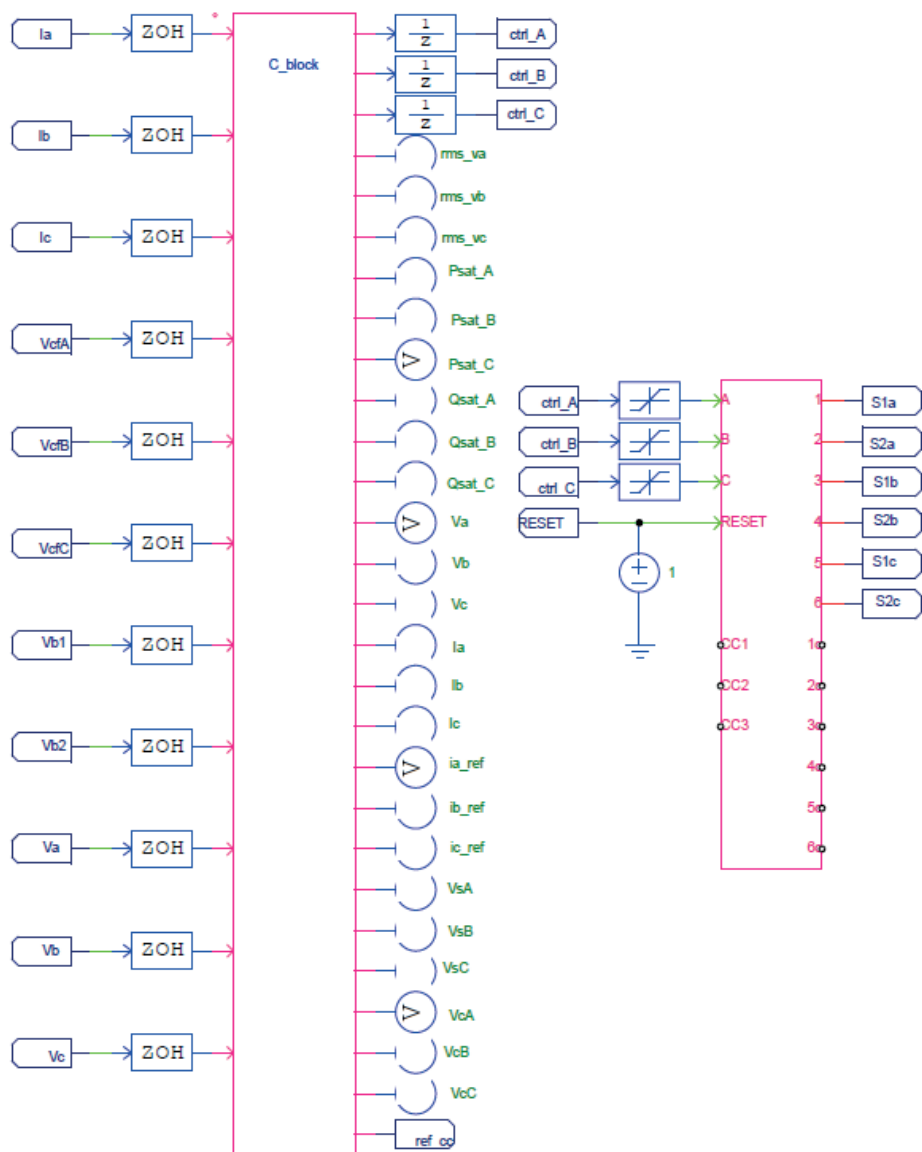
O sistema simulado é mostrado na Figura 50, Figura 51 e Figura 52 sendo composto pela rede elétrica e impedância total da linha, cargas lineares e não lineares, circuito de potência com barramento cc, interruptores e o filtro de saída. Também compõe a simulação o circuito modulador PWM, bloco de programação em C que simula o funcionamento do DSC e os sensores de tensão e corrente. O software PSIM foi utilizado para simulação do conversor e das malhas de controle.

Figura 50 - Circuito de simulação numérica do sistema composto pela rede elétrica e circuito de potência.



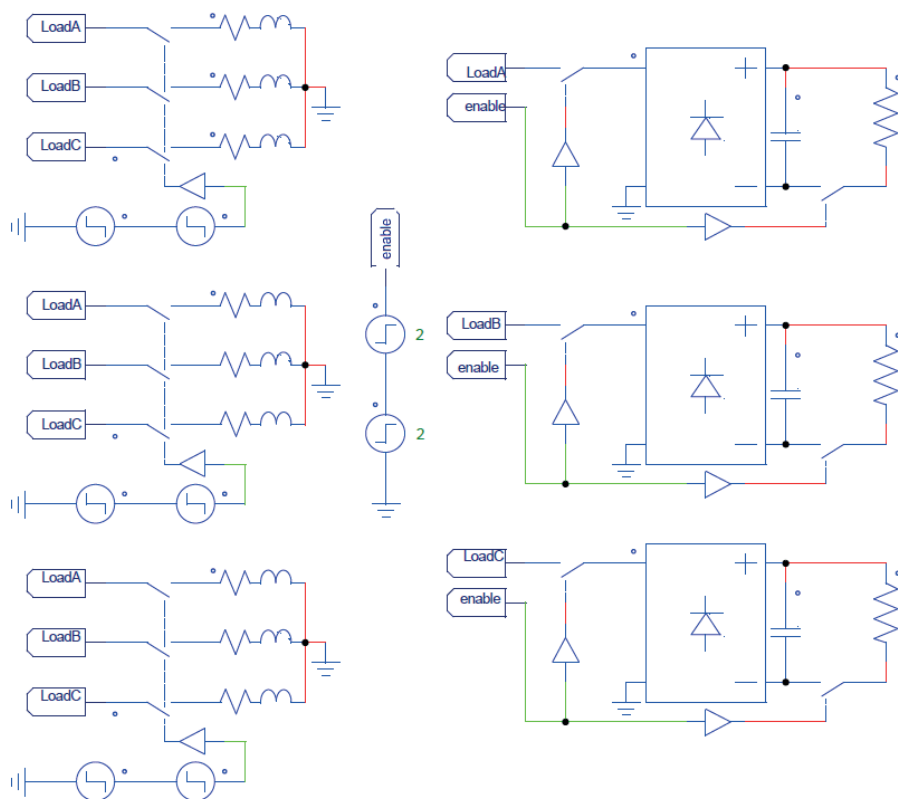
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 51 - Circuito de simulação numérica do sistema composto pelo bloco de controle em C, que representa o DSC e modulador PWM.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 52 - Circuito de simulação numérica do sistema composto pelas cargas lineares e não lineares.



Fonte: Produção do próprio autor.

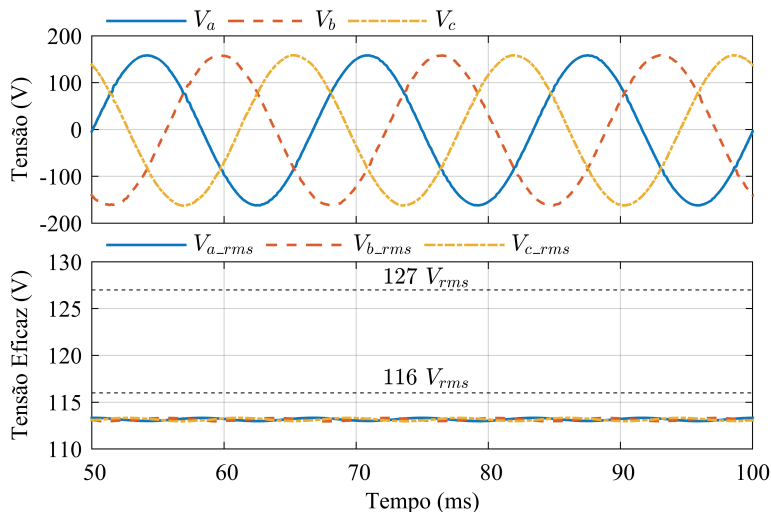
6.3 CARGA LINEAR EQUILIBRADA

As cargas lineares foram divididas em duas cargas. A primeira denominada carga leve utiliza apenas energia reativa para compensação e a segunda denominada carga pesada utiliza energia ativa e reativa.

6.3.1 Carga Leve

Na Figura 53 observam-se as formas de onda das tensões e o valor eficaz das tensões no PCC sem a compensação. O valor eficaz da tensão encontra-se abaixo do limite estabelecido de 0,913 pu, sendo igual a 116 V, o limite para o valor adequado da tensão de fornecimento.

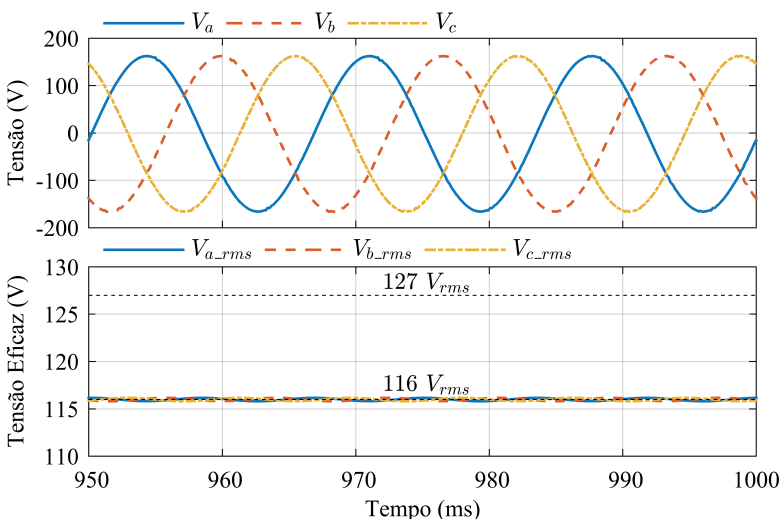
Figura 53 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC sem compensação para carga leve.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 54 observam-se as formas de onda das tensões e o valor eficaz das tensões no PCC com a compensação. O valor eficaz da tensão foi regulado para o valor estipulado como referência. Na Figura 55 são apresentadas as formas de onda da corrente que o conversor injeta na rede e os valores das tensões individuais e da tensão total de barramento, sendo regulado em 500 V.

Figura 54 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC com compensação para carga leve.



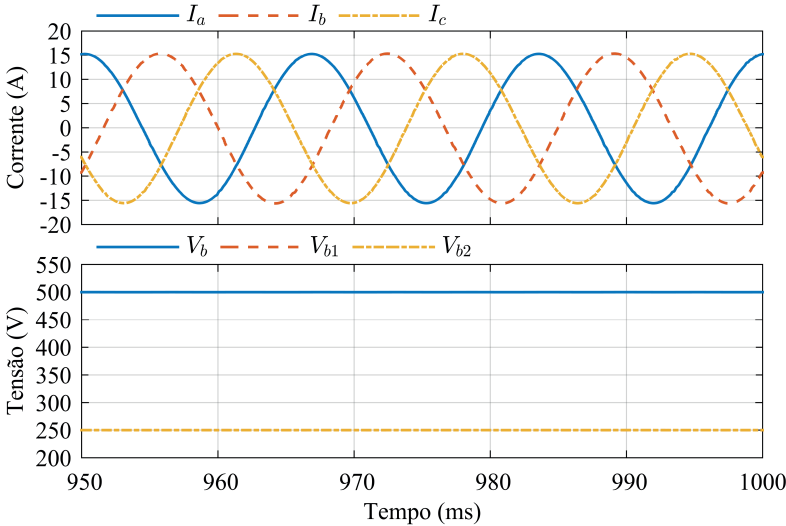
Fonte: Produção do próprio autor.

As referências de corrente em quadratura e fase podem ser observadas na Figura 56, além dos valores eficazes de tensão no PCC durante o início da compensação representado pelo instante “A”.

A utilização de energia ativa não foi necessária, pois foi possível regular a tensão no valor estabelecido utilizando energia reativa. Portanto o valor para referência de corrente em fase manteve-se em zero, conforme a estratégia de controle projetada.

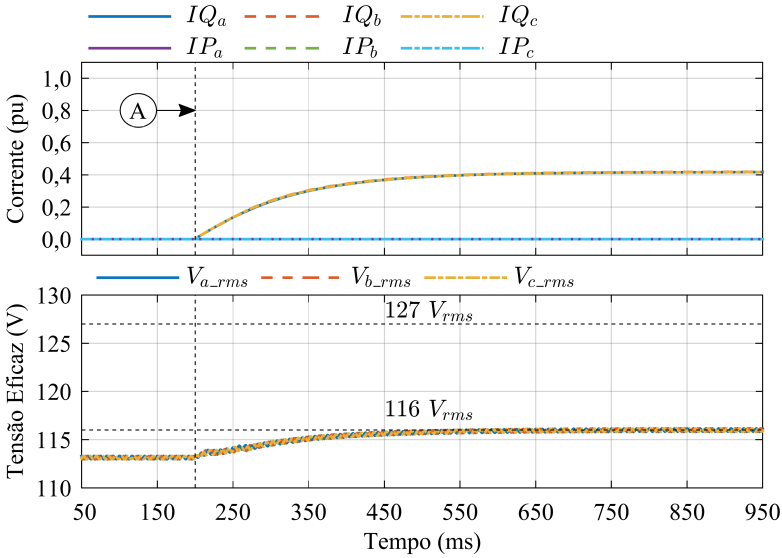
Os resultados para carga leve estão resumidos na Tabela 13, onde são apresentados os resultados sem compensação e com compensação. São apresentados os valores eficazes de tensão e corrente, onde pode-se observar que houve elevação do valor eficaz da tensão nas três fases. Não houve mudanças na *THD* de tensão pois não existem distorções presentes. Os valores de *THD* foram calculados levando em conta até a 51ª harmônica.

Figura 55 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor e tensões individuais e tensão total de barramento para carga leve.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 56 - Referências das correntes em quadratura e em fase e valor eficaz da tensão no PCC durante o início da compensação para carga leve.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 13 - Parâmetros de tensão e corrente do sistema com carga leve.

Parâmetros	Fase	Sem Compensação	Com Compensação
Valor Eficaz da Tensão no PCC	A	113,3 V	116,2 V
	B	113,3 V	116,2 V
	C	113,3 V	116,2 V
THD_v	A	0,51 %	0,43 %
	B	0,64 %	0,45 %
	C	0,57 %	0,40 %
Valor Eficaz da Corrente do Conversor	A	-	10,9 A
	B	-	10,9 A
	C	-	10,9 A
THD_i	A	-	1,38 %
	B	-	1,31 %
	C	-	1,37 %

Fonte: Produção do próprio autor.

6.3.2 Carga Pesada

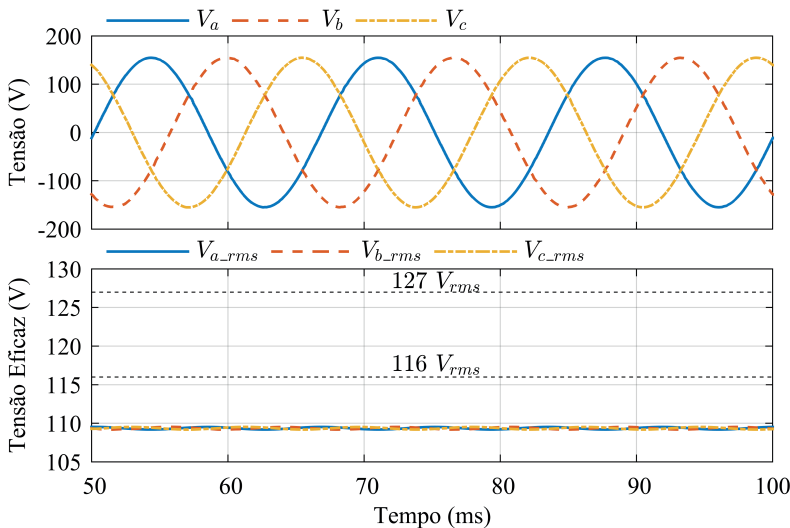
A Figura 57 apresenta as formas de onda das tensões e os seus respectivos valores eficazes no PCC sem a compensação na condição de carga pesada. O valor eficaz da tensão encontra-se abaixo do limite estabelecido.

Na Figura 58 observam-se as formas de onda das tensões e o valor eficaz das tensões no PCC com a compensação. O valor eficaz da tensão foi regulado para a referência de 116 V. Na Figura 59 são apresentadas as formas de onda da corrente que o conversor injeta na rede e os valores das tensões individuais e total de barramento, regulado em 500 V.

As referências de corrente em quadratura e corrente em fase podem ser observadas na Figura 60, além dos valores eficazes de tensão no PCC durante o início da compensação representado no instante "A". Neste caso ocorre a utilização de energia ativa para a compensação, pois, como a referência de corrente em quadratura atinge o máximo e a tensão eficaz no PCC ainda não está regulada no valor estipulado, o controle habilita, no instante "B", a malha para referência de corrente em fase e reduz a referência de corrente em quadratura para não ultrapassar a potência máxima do conversor.

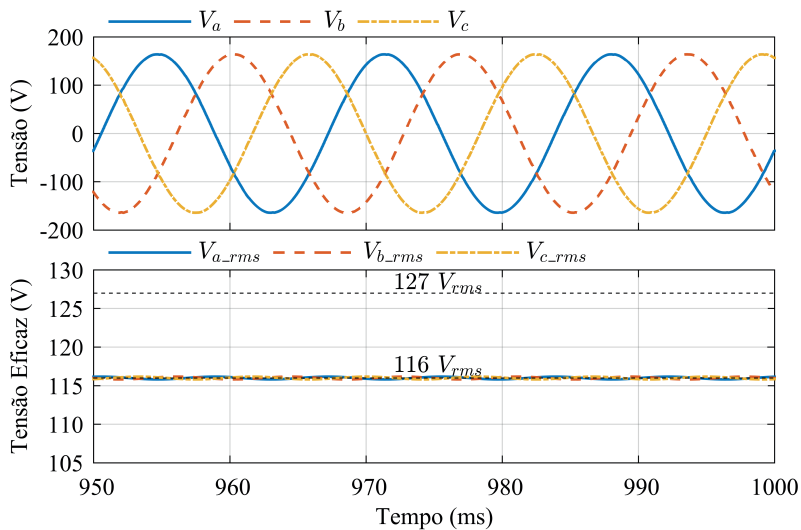
Os resultados para carga pesada estão resumidos na Tabela 14, onde observam-se os resultados sem compensação e com compensação. Nota-se a elevação do valor eficaz nas três fases e a utilização de um maior valor de corrente que no caso de carga leve.

Figura 57 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC sem compensação para carga pesada.



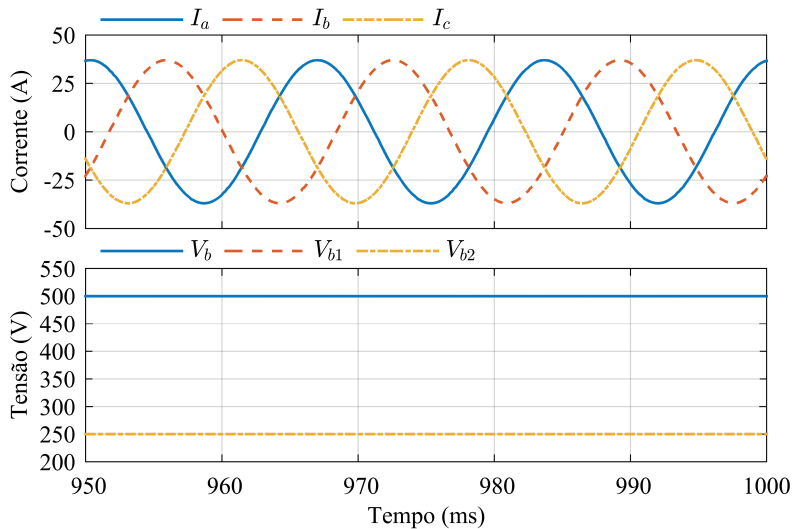
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 58 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC com compensação para carga pesada.



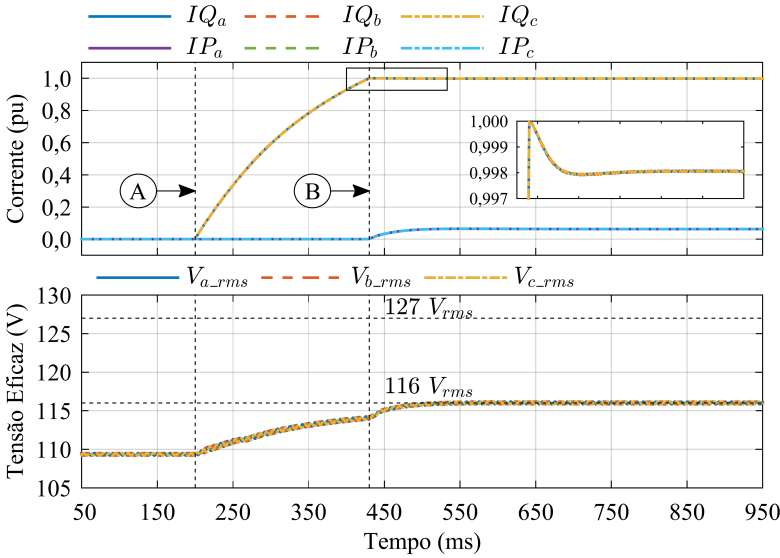
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 59 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor e tensões individuais e tensão total de barramento para carga pesada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 60 - Referências das correntes em quadratura e em fase e valor eficaz da tensão no PCC durante o início da compensação para carga pesada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 14 - Parâmetros de tensão e corrente do sistema com carga pesada.

Parâmetros	Fase	Sem Compensação	Com Compensação
Valor Eficaz da Tensão no PCC	A	109,5 V	116,2 V
	B	109,5 V	116,2 V
	C	109,5 V	116,2 V
THD_v	A	0,18 %	0,15 %
	B	0,30 %	0,14 %
	C	0,23 %	0,11 %
Valor Eficaz da Corrente do Conversor	A	-	26,1 A
	B	-	26,1 A
	C	-	26,1 A
THD_i	A	-	0,18 %
	B	-	0,19 %
	C	-	0,17 %

Fonte: Produção do próprio autor.

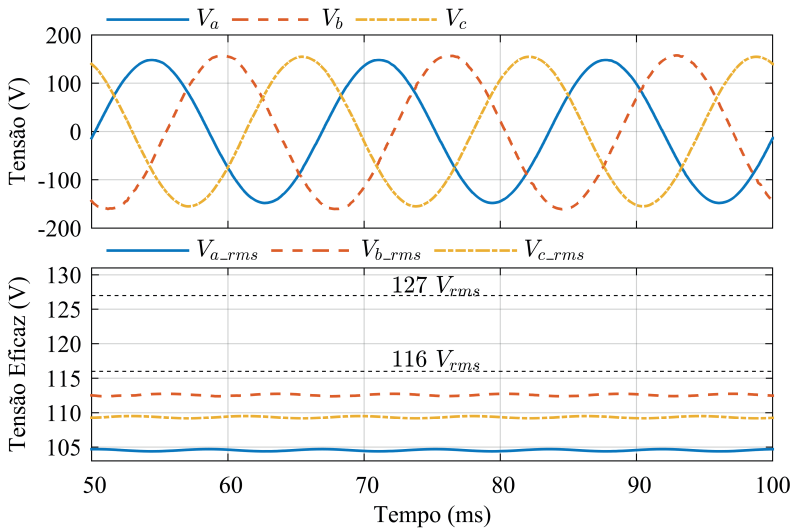
6.4 CARGA LINEAR DESEQUILIBRADA

Para demonstrar o funcionamento independente das malhas de controle por fase, foram selecionadas diferentes cargas por fase. Podem ser observadas na Figura 61 as formas de onda das tensões e o valor eficaz das tensões no PCC sem a compensação. O valor eficaz de cada tensão encontra-se abaixo do limite estabelecido, possuindo valores distintos em cada fase.

Na Figura 62 observam-se as formas de onda das tensões e o valor eficaz das tensões no PCC com a compensação, sendo que os diferentes valores eficazes das tensões foram regulados para o único valor estipulado como referência.

Na Figura 63 são apresentadas as formas de onda da corrente que o conversor injeta na rede e os valores das tensões individuais e da tensão total de barramento, sendo regulada em 500 V. As correntes possuem valores distintos entre as fases, contendo parcelas em quadratura e em fase. As ondulações no barramento são provenientes da carga desequilibrada entre as fases do conversor.

Figura 61 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC sem compensação para carga desequilibrada.



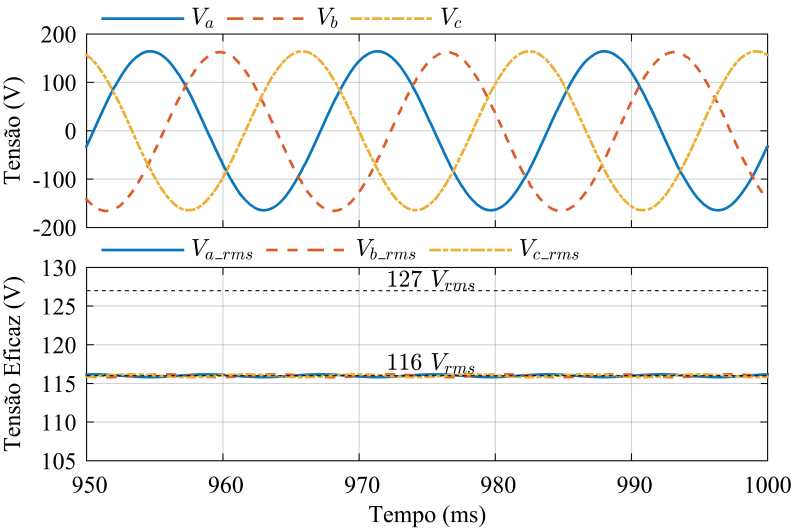
Fonte: Produção do próprio autor.

As referências de corrente em quadratura e fase para as cargas desequilibradas podem ser observadas na Figura 64, além dos valores eficazes de tensão no PCC durante o início da compensação. O instante "A" marca o início da compensação das três fases, sendo que no instante "B" a fase A solicita a energia ativa, enquanto as fases B e C permanecem utilizando somente energia reativa. Pode-se observar

a evidente redução da referência em quadratura da fase A, mantendo a potência aparente dentro do limite do conversor. Como são necessários diferentes valores de corrente para compensação em cada fase, cada referência de corrente atinge um valor.

Os resultados para carga linear desequilibrada estão resumidos na Tabela 15, onde observam-se os resultados sem compensação e com compensação. As tensões eficazes que possuíam valores distintos antes da compensação foram reguladas para o mesmo valor de referência. As correntes utilizadas possuem também possuem valores distintos.

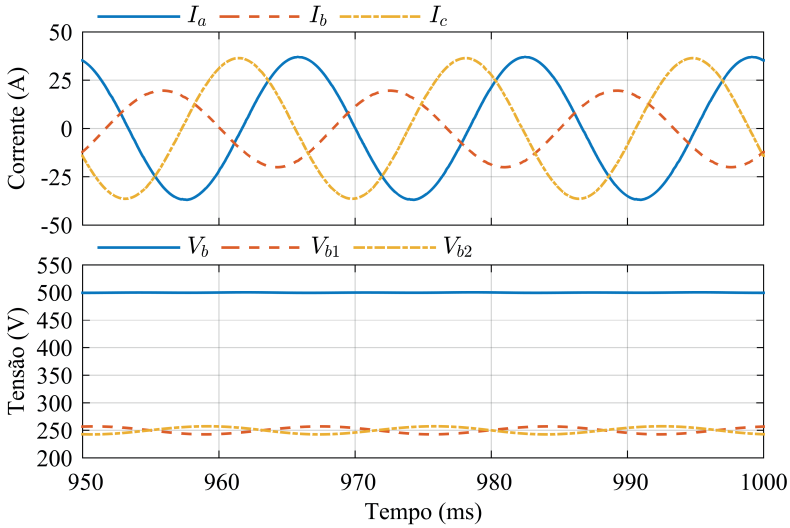
Figura 62 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC com compensação para carga desequilibrada.



Fonte: Produção do próprio autor.

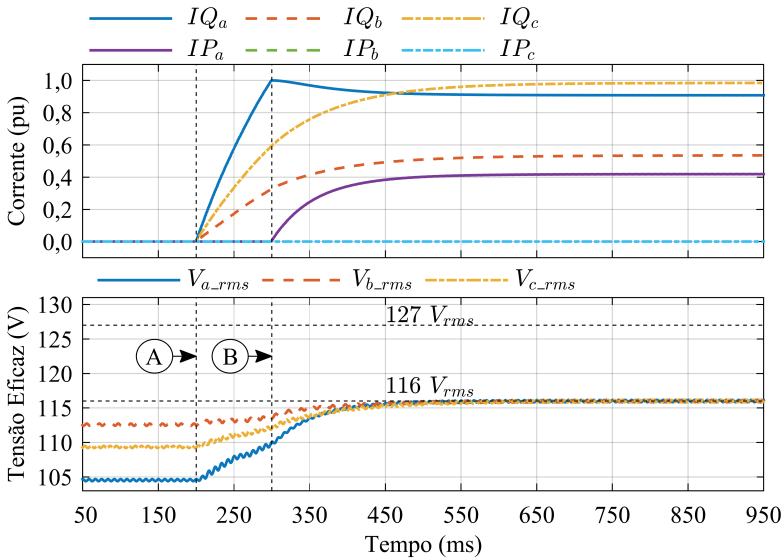


Figura 63 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor e tensões individuais e tensão total de barramento para carga desequilibrada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 64 - Referências das correntes em quadratura e em fase e valor eficaz da tensão no PCC durante o início da compensação para carga desequilibrada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 15 - Parâmetros de tensão e corrente do sistema com carga desequilibrada.

Parâmetros	Fase	Sem Compensação	Com Compensação
Valor Eficaz da Tensão no PCC	A	104,7 V	116,2 V
	B	112,8 V	116,2 V
	C	109,5 V	116,2 V
THD_v	A	0,14 %	0,13 %
	B	0,67 %	0,45 %
	C	0,21 %	0,12 %
Valor Eficaz da Corrente do Conversor	A	-	26,1 A
	B	-	13,9 A
	C	-	25,7 A
THD_i	A	-	0,27 %
	B	-	1,26 %
	C	-	0,27 %

Fonte: Produção do próprio autor.

6.5 REDE DISTORCIDA

A distorção harmônica pode ser encontrada na rede de energia elétrica de distribuição, portanto a tensão que é disponibilizada já possui distorção mesmo sem cargas locais. Assim, foram feitas inserções de harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem para simular o comportamento da rede distorcida nesse caso.

Podem ser observadas, na Figura 65, as formas de onda das tensões e o valor eficaz das tensões no PCC sem a compensação. O valor eficaz de cada tensão encontra-se abaixo do limite estabelecido, possuindo valores distintos em cada fase e conteúdo harmônico mesmo sem a presença de cargas não lineares locais.

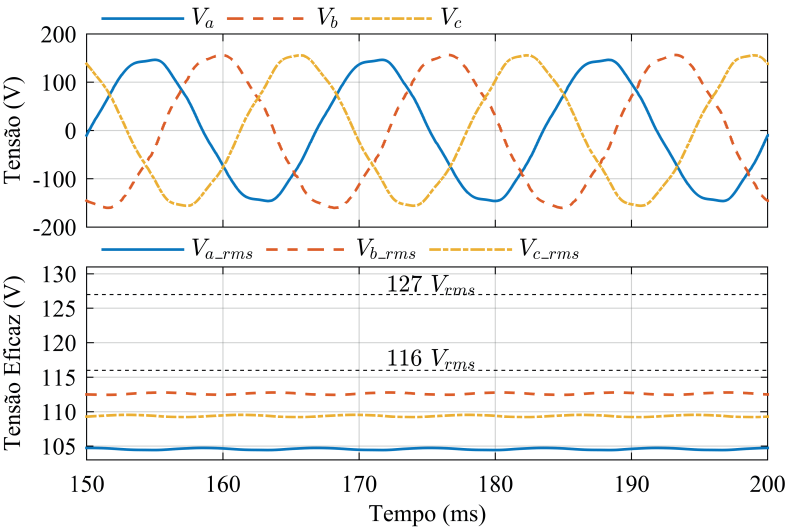
Na Figura 66 observam-se as formas de onda das tensões e o valor eficaz das tensões no PCC com a compensação. Na Figura 67 são apresentadas as formas de onda da corrente que o conversor injeta na rede e os valores das tensões individuais e da tensão total de barramento.

A análise do conteúdo harmônico é mostrada na Figura 68, antes da compensação e após a compensação com valores dos componentes harmônicos reduzidos. Como o controle de harmônicos de tensão é uma função secundária, o controle efetua a atenuação e não elimina-os completamente, como pode ser visto na 3ª, 5ª, 7ª e 9ª harmônicas.

As referências de corrente em quadratura e em fase para a rede distorcida podem ser observadas na Figura 69, além dos valores eficazes de tensão no PCC durante o início da compensação. Os instantes “A” e “B” ocorrem da mesma forma no caso anterior, pois também foram utilizadas cargas desequilibradas na simulação com a rede distorcida.

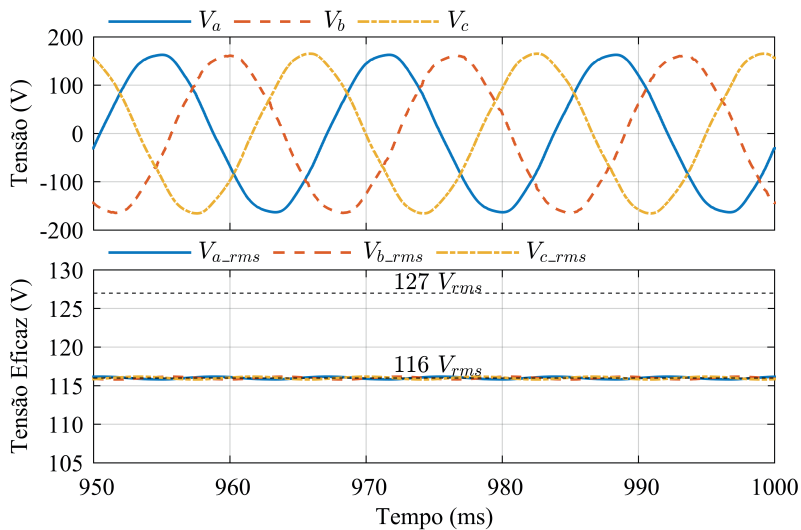
Os resultados para rede distorcida com carga linear desequilibrada estão resumidos na Tabela 16, onde observam-se os resultados sem compensação e com compensação. Os valores de tensão eficaz de cada fase foram regulados para o valor estipulado, assim como a atenuação das harmônicas de tensão, reduzindo a THD em torno de 1% em cada fase.

Figura 65 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC sem compensação para carga linear desequilibrada com rede distorcida.



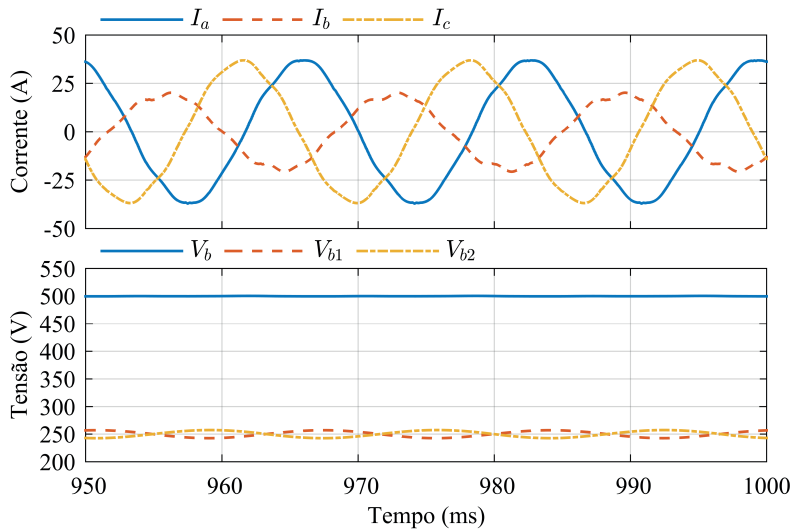
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 66 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC com compensação para carga linear desequilibrada com rede distorcida.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 67 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor e tensões individuais e tensão total de barramento para rede distorcida.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 68 - Conteúdo harmônico das tensões no PCC com rede distorcida e com carga linear desequilibrada sem compensação e com compensação.

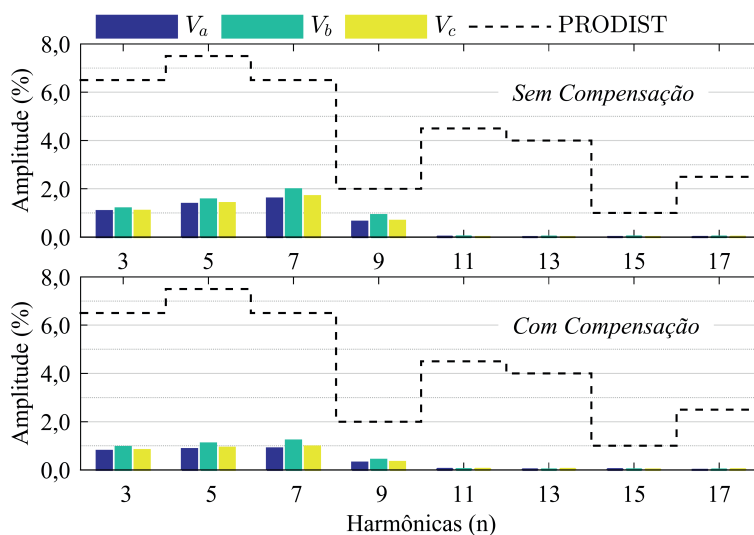


Figura 69 - Referências das correntes em quadratura e em fase e valor eficaz da tensão no PCC durante o início da compensação para rede distorcida e com carga linear desequilibrada.

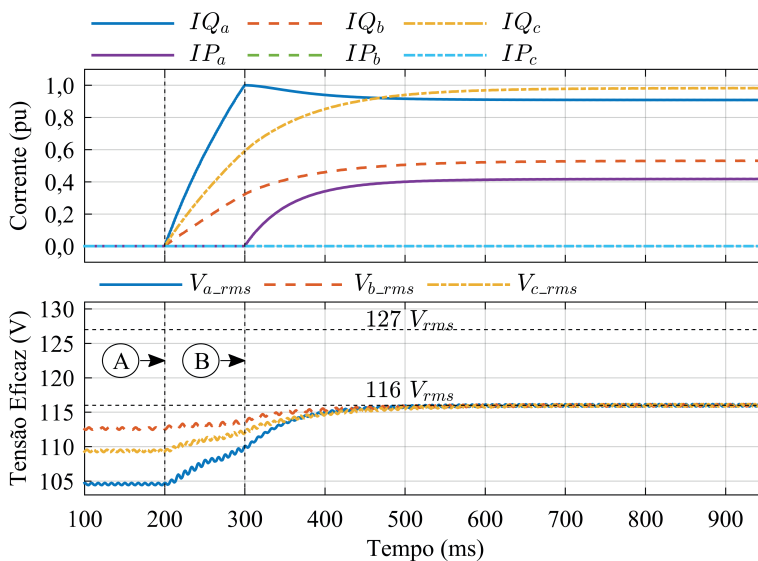


Tabela 16 - Parâmetros de tensão e corrente do sistema com distorção da rede e com carga linear desequilibrada.

Parâmetros	Fase	Sem Compensação	Com Compensação
Valor Eficaz da Tensão no PCC	A	104,7 V	116,2 V
	B	112,8 V	116,2 V
	C	109,5 V	116,2 V
THD _v	A	2,45 %	1,50 %
	B	2,97 %	2,01 %
	C	2,55 %	1,60 %
Valor Eficaz da Corrente do Conversor	A	-	26,1 A
	B	-	13,9 A
	C	-	25,7 A
THD _i	A	-	2,64 %
	B	-	6,66 %
	C	-	2,91 %

Fonte: Produção do próprio autor.

6.6 CARGA NÃO LINEAR

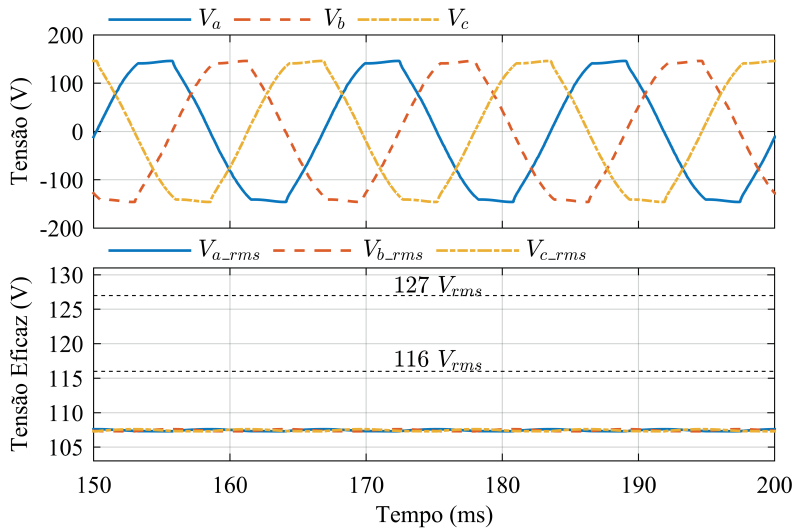
As cargas não lineares locais também podem contribuir para a distorção das formas de onda da tensão. Portanto, foram adicionados retificadores monofásicos ponte-completa para cada fase em conjunto com cargas lineares para que a distorção harmônica fosse ressaltada na rede.

Podem ser observadas, na Figura 70, as formas de onda das tensões distorcidas quando submetidas a cargas não lineares e o valor eficaz das tensões no PCC sem a compensação. O valor eficaz de cada tensão encontra-se abaixo do limite estabelecido, além de possuir distorção harmônica na tensão no PCC.

Na Figura 71 observa-se as formas de onda das tensões e o valor eficaz com a regulação e a atenuação de harmônicos. Na Figura 72 são apresentadas as formas de onda da corrente que o conversor injeta na rede e os valores das tensões individuais e da tensão total de barramento.

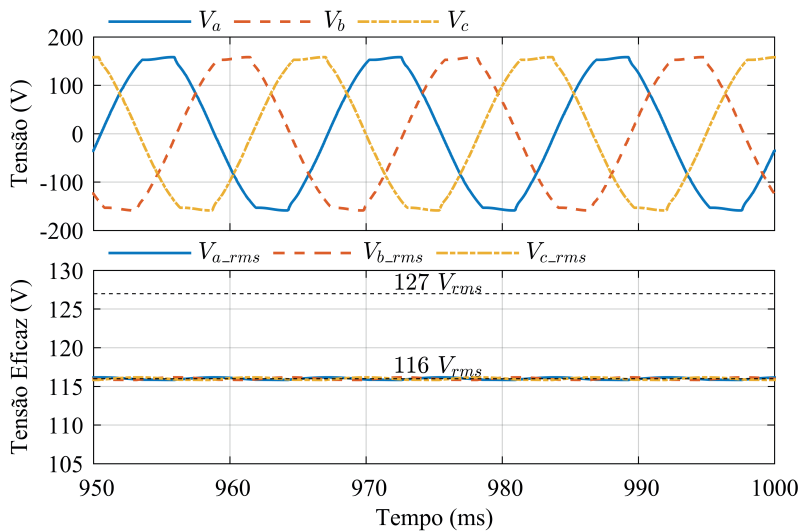
As referências de corrente em quadratura e fase para as cargas lineares equilibradas e não lineares podem ser observadas na Figura 73, além dos valores eficazes de tensão no PCC durante o início da compensação.

Figura 70 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC sem compensação para carga não linear e carga equilibrada.



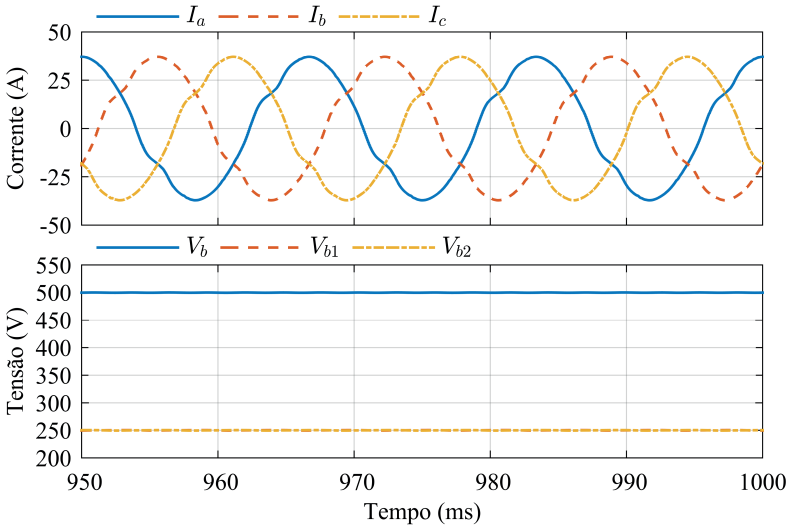
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 71 - Formas de onda e valores eficazes das tensões no PCC com compensação para carga não linear e carga equilibrada.



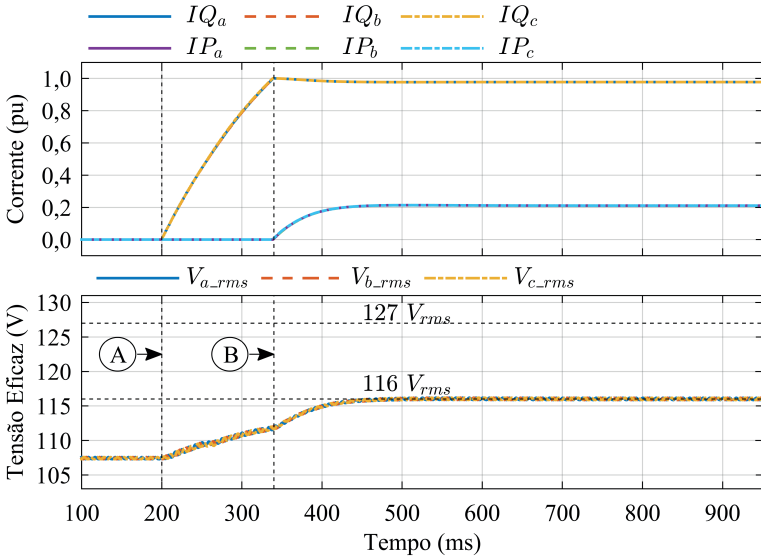
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 72 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor e tensões individuais e tensão total de barramento para carga não linear.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 73 - Referências das correntes em quadratura e em fase e valor eficaz da tensão no PCC durante o a compensação para carga não linear.

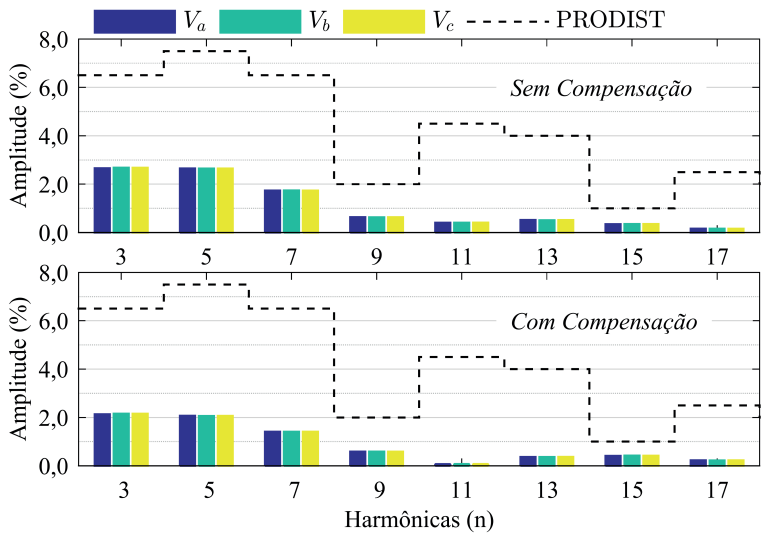


Fonte: Produção do próprio autor.

A análise do conteúdo harmônico é mostrada na Figura 74, antes e após a atenuação de harmônicos. Como já dito anteriormente o controle de harmônicos é uma função secundária, efetuando somente a atenuação e não eliminando completamente os harmônicos de tensão. Pode-se notar uma diminuição das amplitudes das harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem.

Os resultados para cargas não lineares e lineares equilibradas estão resumidos na Tabela 17, onde observa-se os resultados sem compensação e com compensação. Os valores eficazes de tensão no PCC são regulados e ocorre uma atenuação da THD em torno de 1 % para carga não linear.

Figura 74 - Conteúdo harmônico das tensões no PCC sem e com compensação para carga não linear.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 17 - Parâmetros de tensão e corrente do sistema com carga não linear equilibrada.

Parâmetros	Fase	Sem Compensação	Com Compensação
Valor Eficaz da Tensão no PCC	A	107,6 V	116,2 V
	B	107,6 V	116,2 V
	C	107,6 V	116,2 V
THD_v	A	4,29 %	3,43 %
	B	4,30 %	3,44 %
	C	4,30 %	3,44 %
Valor Eficaz da Corrente do Conversor	A	-	26,1 A
	B	-	13,9 A
	C	-	25,7 A
THD_i	A	-	0,27 %
	B	-	1,26 %
	C	-	0,27 %

Fonte: Produção do próprio autor.

6.7 DINÂMICA DE CARGA

Para se avaliar o comportamento da estratégia de compensação com energia ativa e reativa foram executados degraus de cargas, para que fossem observadas as trocas de referências e malhas das referências em quadratura e em fase.

Foram definidas duas condições de teste que compreendem uma troca de carga leva para pesada. Antes do primeiro degrau, somente energia reativa é utilizada para a compensação e após o degrau ocorre a utilização de energia ativa. E no segundo degrau, de carga pesada para carga leve, onde a energia ativa não é necessária para a compensação após o degrau. Essas condições mostram as regras definidas para as trocas de malhas estabelecidas nos capítulos anteriores.

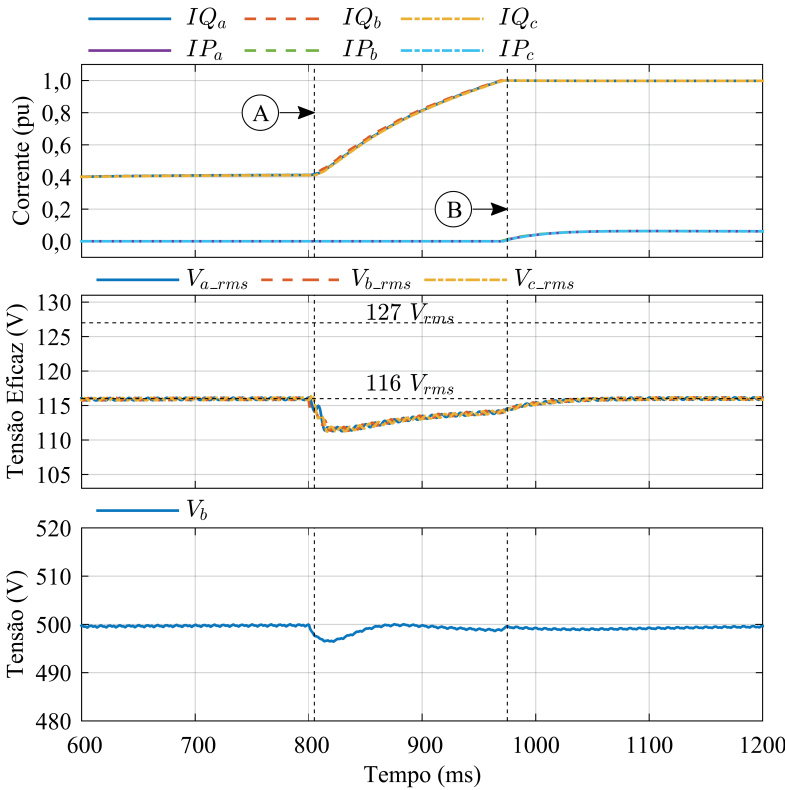
6.7.1 Carga Leve para Carga Pesada

As referências de corrente em quadratura e fase para o degrau carga leve para carga pesada pode ser observado na Figura 75, além dos valores eficazes de tensão no PCC e tensão de barramento total durante o processo de compensação.

Na carga leve as referências em fase estão zeradas, utilizando somente a referência em quadratura, portanto energia reativa. Quando ocorre o degrau de carga, no instante "A", o valor eficaz da tensão cai abaixo do limite, elevando as referências de corrente em quadratura. Quando o sistema atinge o limite de

compensação reativo então a referência em fase aumenta, no instante "B", e a em quadratura reduz para não exceder a potência aparente do conversor. As tensões de barramento sofrem pequenas ondulações durante as trocas de malhas, porém se mantêm reguladas.

Figura 75 - Referências das correntes em quadratura e em fase, o valor eficaz da tensão no PCC e a tensão total de barramento durante o degrau de carga leve para pesada.

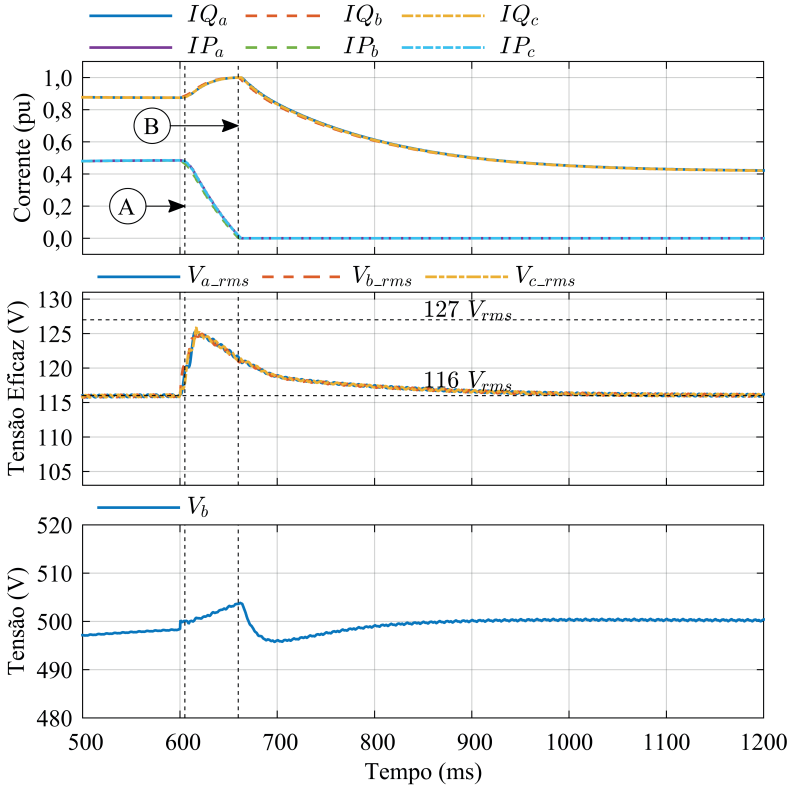


Fonte: Produção do próprio autor.

6.7.2 Carga Pesada para Carga Leve

Durante o degrau de carga pesada para leve, podem ser observadas as referências de corrente em quadratura e fase na Figura 76, além dos valores eficazes de tensão no PCC e tensão de barramento total durante o início da compensação.

Figura 76 - Referências das correntes em quadratura e em fase, o valor eficaz da tensão no PCC e a tensão total de barramento durante o degrau de carga pesada para leve.



Fonte: Produção do próprio autor.

Diferente do caso anterior, a carga necessita de energia ativa para compensação do valor eficaz da tensão no PCC, portanto quando ocorre um degrau para carga leve, instante "A", deve-se reduzir a referência em fase até que esteja em um valor nulo para que ocorra a troca das malhas de referência, no instante "B". Assim, respeitando as condições estipuladas na estratégia de compensação ocorre a troca de malhas e o valor de referência em quadratura decresce até estabilizar seu valor de acordo com a referência de tensão eficaz no PCC. As tensões de barramento sofrem pequenas ondulações durante as trocas de malhas, porém também se mantêm reguladas.

Independentemente das cargas ou dos degraus aplicados, a estratégia de compensação garante a utilização mínima da energia ativa. Mantendo sua utilização somente quando o controle identifica que se faz necessário seu uso para a elevação do valor eficaz de tensão no PCC.

6.8 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

São apresentadas neste capítulo as simulações numéricas do conversor. São selecionadas e apresentadas as cargas para se observar a queda de tensão no PCC devido as impedâncias das linhas e o funcionamento do conversor compensando o valor eficaz da tensão no PCC e a atenuação das harmônicas de tensão.

As cargas lineares equilibradas apresentaram boa resposta na regulação do valor eficaz de tensão, permanecendo com baixa distorção harmônica, como esperado. O mesmo acontece com as cargas lineares desequilibradas, ainda que com valores distintos de corrente em cada fase. As trocas de malhas e de referências não trouxeram problemas de estabilidade para o sistema de controle.

Para rede distorcida e para cargas não lineares, além da regulação do valor eficaz, as tensões no PCC tiveram seus valores de *THD* reduzidos em torno de 1% e harmônicos de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem atenuadas. Como o controle foi projetado para que não houvesse a eliminação das harmônicas, apenas atenuação, esse resultado era esperado.

Ambos os degraus de carga mostraram que a estratégia de compensação e as malhas de controle de energia ativa e reativa obtiveram um desempenho adequado. O seu funcionamento seguiu as condições estipuladas na etapa de projeto, não havendo trocas indesejadas entre malhas, nem instabilidade proveniente dos sistemas de controle.

Por fim, foram comprovadas as metodologias utilizadas na modelagem e controle do projeto do conversor.



7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A construção e implementação do conversor proposto é uma etapa que visa a validação e comprovação das estratégias e malhas de controle. Nesta seção é apresentado o circuito de potência experimental, com fotos da montagem do protótipo, além da apresentação do *DSC* utilizado e suas características. Apresenta-se também o fluxograma de funcionamento do programa implementado digitalmente. E por fim são apresentados os resultados experimentais obtidos com o protótipo implementado em laboratório.

7.1 CIRCUITO EXPERIMENTAL

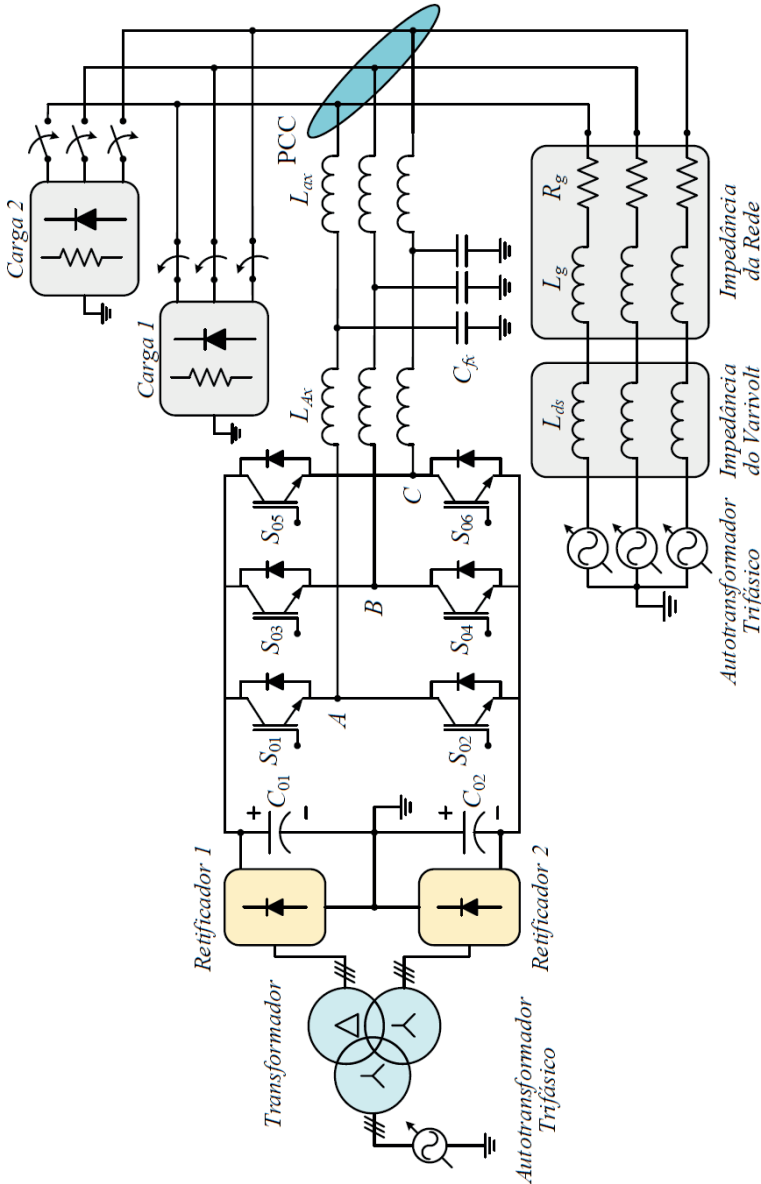
O circuito de potência experimental implementado no laboratório é apresentado na Figura 77. O sistema construído é trifásico a quatro fios composto pelo barramento com ponto central, interruptores de potência, filtro LCL de saída, PCC, cargas lineares e não lineares, impedância da rede levando em conta a impedância do autotransformador trifásico.

Como a rede de distribuição de baixa tensão do laboratório é de 220 V de fase, utilizou-se um autotransformador ajustável, para adequar o nível de tensão de operação do protótipo. A utilização deste equipamento não prejudica as análises nem a operação do conversor.

Para reproduzir o comportamento de uma fonte de energia conectada ao barramento foi utilizado um estágio retificador, composto por um segundo autotransformador trifásico conectado a um transformador trifásico isolador com uma entrada em estrela e duas saídas, em delta e estrela, seguidos de dois retificadores trifásicos em ponte completa para cada saída do transformador. Portanto, neste arranjo o barramento permanece balanceado e fixado no valor total de referência de 500 V. Devido a esta modificação do circuito foram removidas as malhas de controle de tensão total e diferencial, uma vez que as tensões já estão fixadas no valor de operação. Esta alteração não traz prejuízos as análises efetuadas nos capítulos anteriores, nem prejudica as malhas de controle e gerenciamento do conversor.

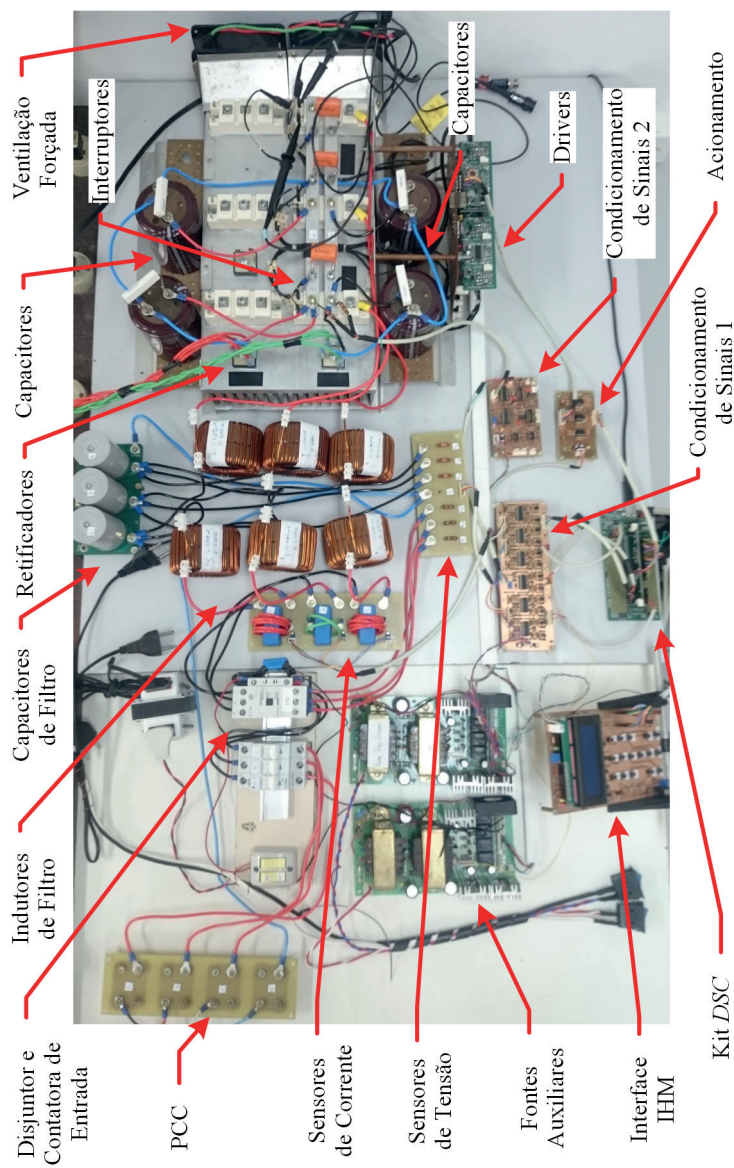
Na Figura 78 é apresentada uma foto da montagem experimental do protótipo em laboratório, composto pelo disjuntor e pela contadora de entrada, PCC, sensores de corrente e tensão, fontes auxiliares, interface *IHM*, kit *DSC*, condicionamento de sinais 1 e 2, acionamento, drivers, capacitores de barramento, interruptores de potência, retificadores, indutores e capacitores de filtro e ventilação.

Figura 77 - Montagem experimental do protótipo conectada às cargas, a rede elétrica com impedância de rede e autotransformador.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 78 - Foto do protótipo implementado.



Fonte: Produção do próprio autor.

A utilização do autotransformador adiciona uma impedância ao sistema e deve-se levar em conta para compor a impedância total da linha. Apesar dos valores elevados das impedâncias experimentais comparados as impedâncias de simulação, não houve prejuízo para a análise uma vez que a relação entre as parcelas resistivas e indutivas mantiveram-se próximas.

A Tabela 18 traz resumo do comparativo entre as impedâncias de simulação e experimentais.

Tabela 18 - Parâmetros de impedância de linha para a simulação e experimental.

Parâmetros	Parcela	Simulação	Experimental
Impedância da Linha	R	774,6 m Ω	3,00 Ω
	L	858,9 μ H	1,00 mH
Impedância do autotransformador	R	-	103,56 m Ω
	L	-	2,20 mH
Impedância Total	R	774,6 m Ω	3,10 Ω
	L	858,9 μ H	3,20 mH
Relação	R / X	2,392	2,573
Módulo	$ Z $	0,840	3,330

Fonte: Produção do próprio autor.

O efeito causado por uma impedância com módulo maior é a parcela de tensão que fica sobre a impedância da linha, resulta em um pior caso do que os casos simulados.

7.2 CONTROLADOR DIGITAL DE SINAIS

O controlador digital de sinais (*DSC*) utilizado para implementar as malhas de controle digital, as estratégias de compensação, as proteções, aquisições, os sinais de comando e comunicação com a interface foi o modelo TMS320F28335 da fabricante *Texas Instruments*.

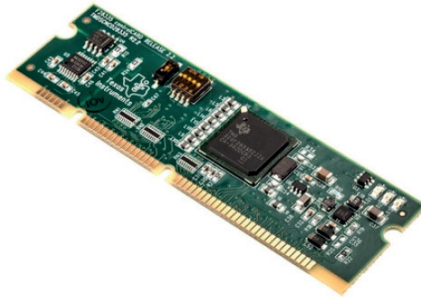
As principais características do *DSC* utilizado estão listadas abaixo:

- ✓ Até 150 MHz (Tempo de ciclo: 6,67 ns).
- ✓ CPU de alta performance de 32 bits:
 - IEEE-754 *Single Precision Floating-Point Unit (FPU)*
 - Arquitetura *Harvard*.
- ✓ Memória interna (*On-Chip*):
 - Flash: 256K x 16.
 - SARAM: 34K x 16.

- ✓ Conversor Analógico-Digital (ADC):
 - 16 Canais de 12 Bits.
 - Taxa de conversão de até 80 ns.
 - 2 x 8: Canais de entrada multiplexadas.
 - Conversões Individuais ou Simultâneas.
- ✓ Periféricos de controle avançados:
 - Até 18 saídas *PWM*.
- ✓ Três contadores (*CPU Timers*) de 32 bits.
- ✓ Até 88 portas multiplexadas, individualmente programáveis para entrada ou saída de dados. (*GPIO*).

Na Figura 79 pode-se observar a imagem da *daughter board* modelo TMDSCNCD28335 utilizada do kit de desenvolvimento modelo TMDSDOCK28335.

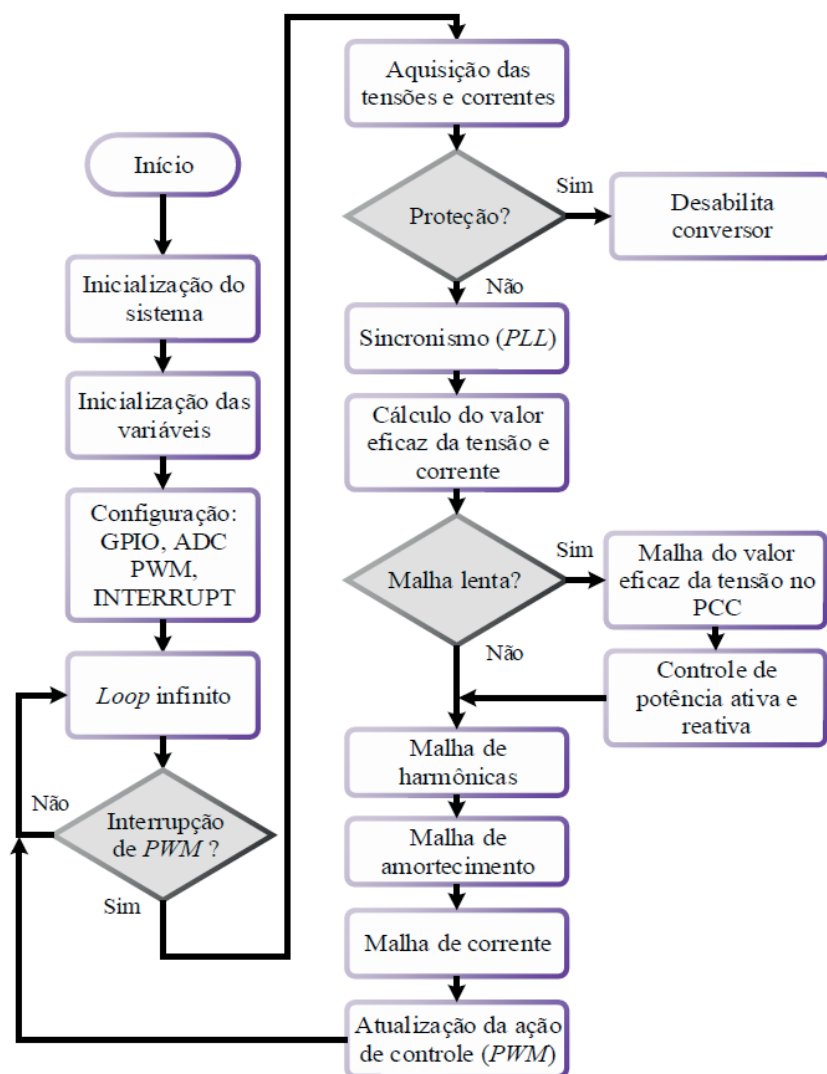
Figura 79 - Imagem da *daughter board* do DSC utilizado.



Fonte: *Texas Instruments*.

Toda programação foi desenvolvida no *software* fornecido pelo fabricante, *Code Composer Studio* (CSS) V6.1.0, em linguagem de programação C, dita de alto nível. A utilização do *software* permite a análise do programa em tempo real com a possibilidade de se utilizar *breakpoints*, visualizar variáveis, vetores e gráficos.

Figura 80 - Fluxograma da lógica de funcionamento implementada no DSC.



Fonte: Produção do próprio autor.

O fluxograma de funcionamento da lógica implementada no DSC é mostrado na Figura 80. Após a inicialização do sistema, das variáveis e dos registradores, o sistema permanece em *loop* infinito aguardando as interrupções de PWM. Dentro das interrupções são feitas as aquisições dos valores de tensão e corrente, em seguida são executadas as proteções, o sincronismo, o cálculo da tensão e corrente eficaz. São executadas as malhas de controle e por fim são atualizadas as ações de controle retornando ao *loop* infinito.

7.3 RESULTADOS OBTIDOS

Para mostrar o funcionamento do protótipo e a operação do sistema são apresentadas algumas condições em que o conversor pode estar operando. Resultados onde somente energia reativa é utilizada e onde energia ativa e reativa são utilizadas, além de compensar cargas desequilibradas, não lineares e degraus de carga de leve para pesada e o inverso também. Como o conversor foi testado conectado à rede elétrica, pode-se observar que as tensões no PCC possuem um leve desequilíbrio entre fases e um pequeno conteúdo harmônico.

Para as medições dos valores das tensões e correntes são utilizados os osciloscópios modelos TDS2024C, TDS2014B, TBS1042B, da fabricante *Tektronix*. Para as medições de potência ativa, reativa e aparente foram utilizados os analisadores de energia modelo PA4000, também da fabricante *Tektronix*, mostrado na Figura 81. Os dados das tensões, correntes e potências são coletados e armazenados para análise. Em seguida são obtidos os gráficos a partir desses dados no *software* MATLAB.

Figura 81 - Imagem do analisador de energia modelo PA4000.



Fonte: *Tektronix*.

O analisador de energia disponibiliza os dados coletados com uma taxa de atualização máxima de 0,5 s, apesar da capacidade de ler sinais de tensão e corrente de até 50 kHz. Por esse motivo as dinâmicas rápidas das potências não serão observadas nos resultados experimentais, somente seus valores em regime.

7.3.1 Carga Linear Equilibrada

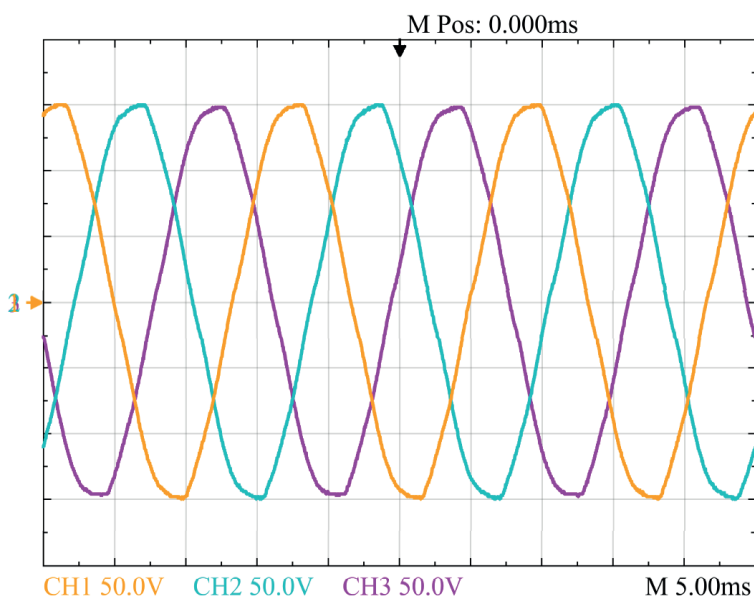
As cargas lineares equilibradas foram divididas em duas etapas, a primeira etapa onde somente energia reativa é utilizada para compensação e a segunda etapa onde energia ativa e reativa são utilizadas. A restrição é feita no software, não permitindo que o conversor utilize as referências em fase. Esses ensaios têm o intuito de apresentar, que sem a utilização de energia ativa a tensão eficaz no PCC não atinge o valor de referência. Em seguida, a restrição é removida do software de controle, para mostrar o resultado da injeção de potência ativa para regulação de tensão.

7.3.1.1 Com Restrição de Energia Ativa

Na Figura 82 são apresentadas as formas de onda de tensão no PCC sem compensação e na Figura 83 são apresentadas as formas de onda no PCC com compensação, para carga linear equilibrada, com restrição de energia ativa. É possível observar um pequeno conteúdo harmônico presente na rede mesmo sem a conexão do conversor.

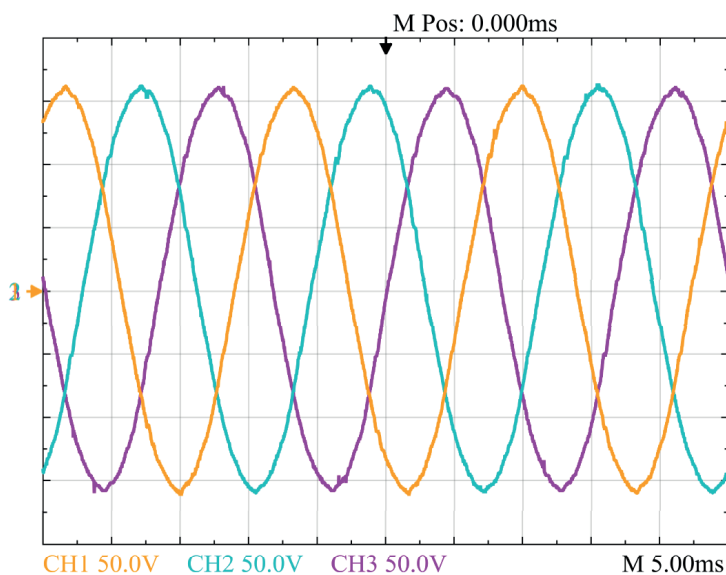
Na Figura 84 são apresentadas as formas de onda das correntes injetadas pelo conversor para carga linear equilibrada. A análise do conteúdo harmônico das tensões é mostrada na Figura 85, antes da compensação e após a compensação com valores dos principais componentes harmônicos reduzidos.

Figura 82 - Formas de onda experimentais da tensão no PCC sem compensação para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.



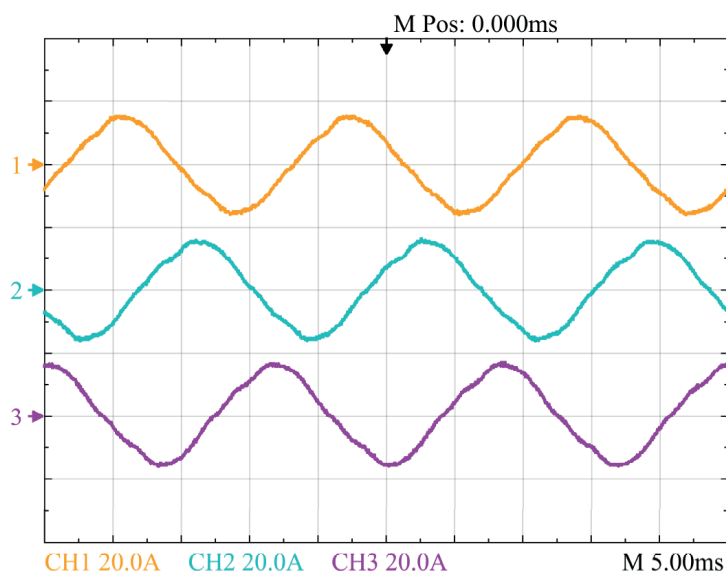
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 83 - Formas de onda experimentais da tensão no PCC com compensação para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 84 - Formas de onda experimentais das correntes injetadas pelo conversor para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.



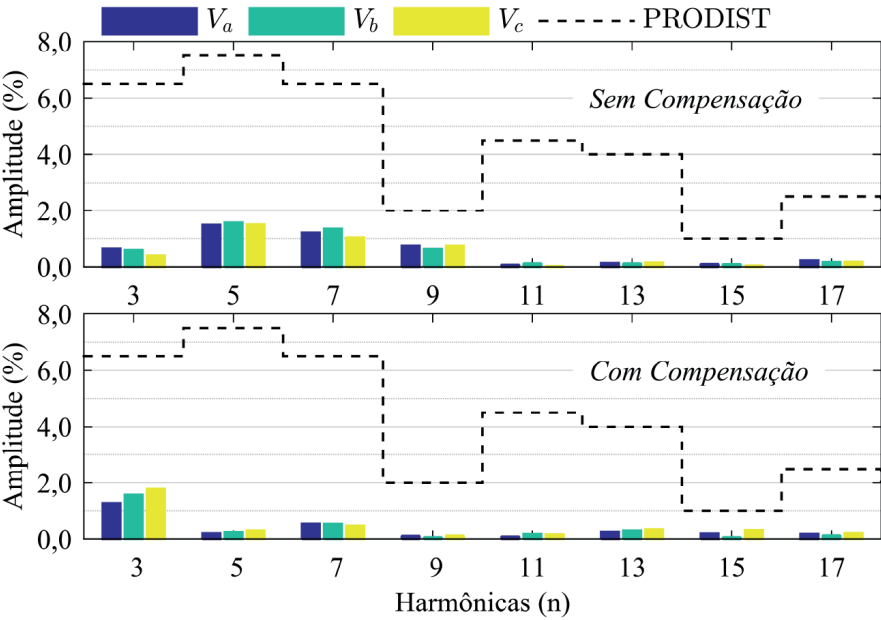
Fonte: Produção do próprio autor.

É possível observar o conteúdo harmônico das correntes do conversor na Figura 86, tais componentes são provenientes da malha de controle para atenuação dos harmônicos de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordens.

Na Figura 87 são apresentados os gráficos de potência ativa, reativa e aparente do conversor. A compensação inicia-se a partir do instante “1” onde ocorre a elevação da potência reativa. Neste caso a potência ativa permanece nula, pois restringiu-se a utilização de energia ativa e o valor de tensão eficaz não atinge a referência estipulada de 1,00 pu (127,0 V). No instante “2” o conversor é desligado.

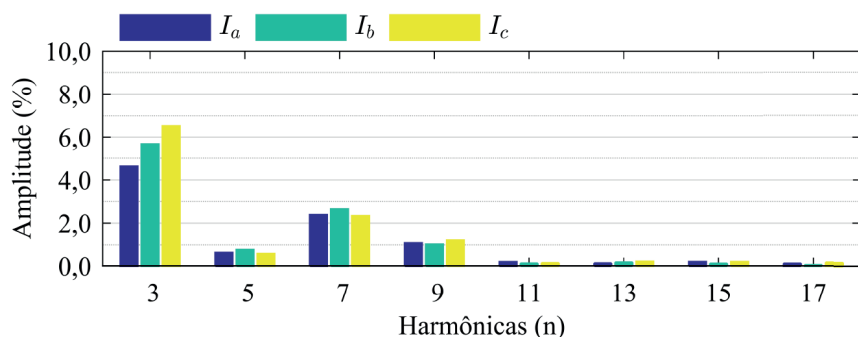
Um resumo dos parâmetros experimentais de tensão e corrente são mostrados na Tabela 19 para o funcionamento do conversor com carga linear equilibrada com restrição de energia ativa. Os valores de *THD* das tensões no PCC foram levemente reduzidos para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa

Figura 85 - Conteúdo harmônico experimental das tensões no PCC sem e com compensação para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.



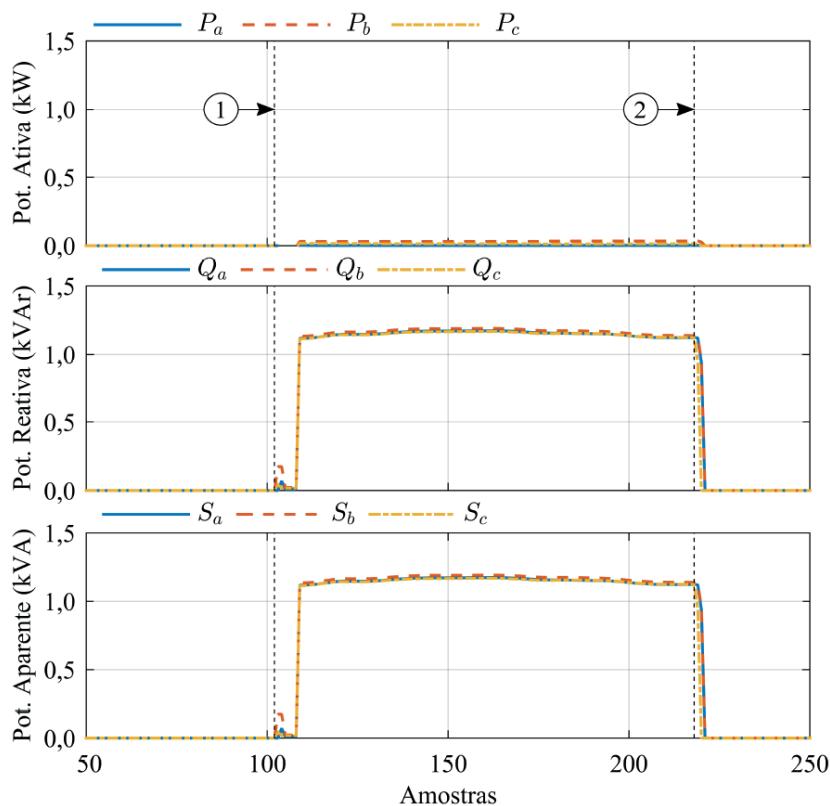
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 86 - Conteúdo harmônico experimental das correntes injetadas pelo conversor para carga linear com restrição de energia ativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 87 - Gráficos experimentais das potências ativa, reativa e aparente para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 19 - Parâmetros experimentais de tensão e corrente do sistema com carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.

Parâmetros	Fase	Sem Compensação	Com Compensação
Valor Eficaz da Tensão no PCC	A	106,5 V	112,7 V
	B	106,3 V	113,3 V
	C	105,6 V	112,7 V
THD_v	A	2,23 %	1,62 %
	B	2,32 %	1,92 %
	C	2,10 %	2,09 %
Valor Eficaz da Corrente do Conversor	A		10,3 A
	B	-	10,5 A
	C		10,8 A
THD_i	A		5,61 %
	B	-	6,56 %
	C		7,19 %

Fonte: Produção do próprio autor.

7.3.1.2 Sem Restrição de Energia Ativa

Agora são apresentados os resultados sem a restrição de energia ativa. Na Figura 88 são apresentadas as formas de onda de tensão no PCC sem compensação e na Figura 89 são apresentadas as formas de onda no PCC com compensação para carga linear equilibrada.

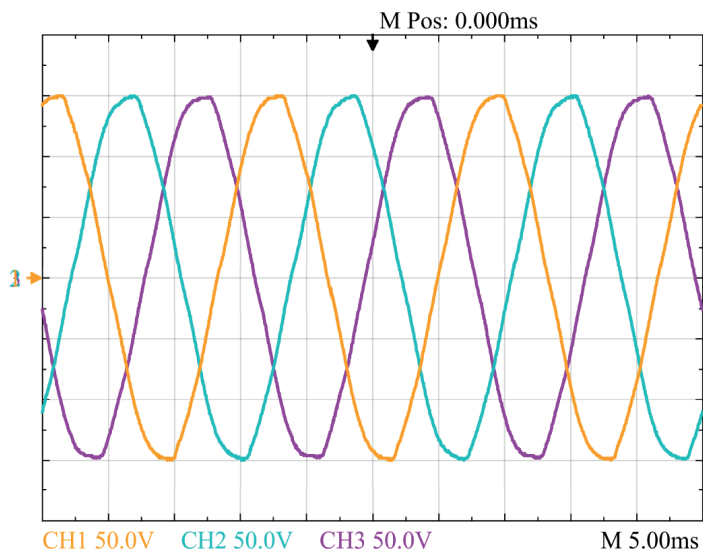
Na Figura 90 são apresentadas as formas de onda das correntes injetadas pelo conversor para carga linear equilibrada.

O conteúdo harmônico das tensões no PCC antes e depois da compensação é mostrado na Figura 91. Pode-se observar que a maioria das harmônicas sofre uma atenuação devido à malha de controle. Na Figura 92 é mostrado o conteúdo harmônico da corrente do conversor.

Na Figura 93 são apresentados os gráficos de potência ativa, reativa e aparente do conversor. A compensação também inicia-se a partir do instante "1" porém neste caso ocorre a utilização da potência ativa e reativa, em torno de 581 W e 1183 Var, respectivamente, resultando em 1318 VA de potência aparente. Assim, o valor de tensão eficaz atinge a referência estipulada de 1,00 pu (127,0 V) e no instante "2" o conversor é desligado.

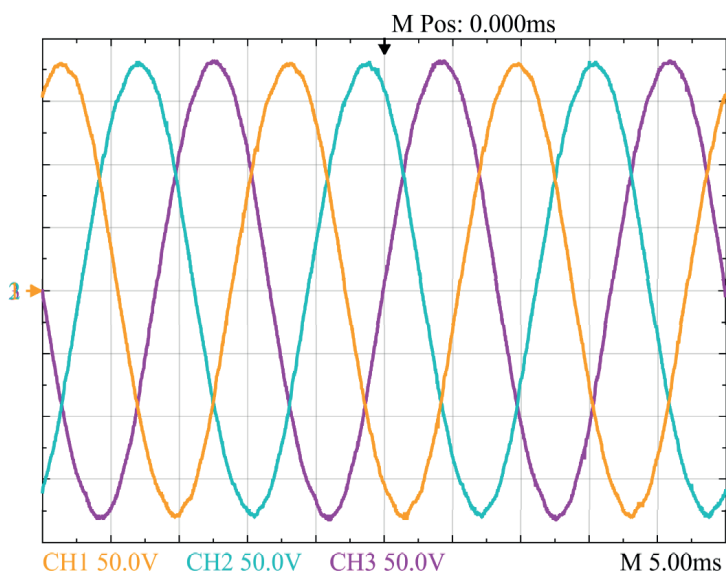
Um resumo dos parâmetros experimentais de tensão e corrente são mostrados na Tabela 20 para o funcionamento do conversor com carga linear equilibrada sem restrição de energia ativa.

Figura 88 - Formas de onda experimentais da tensão no PCC sem compensação para carga linear equilibrada sem restrição de energia ativa



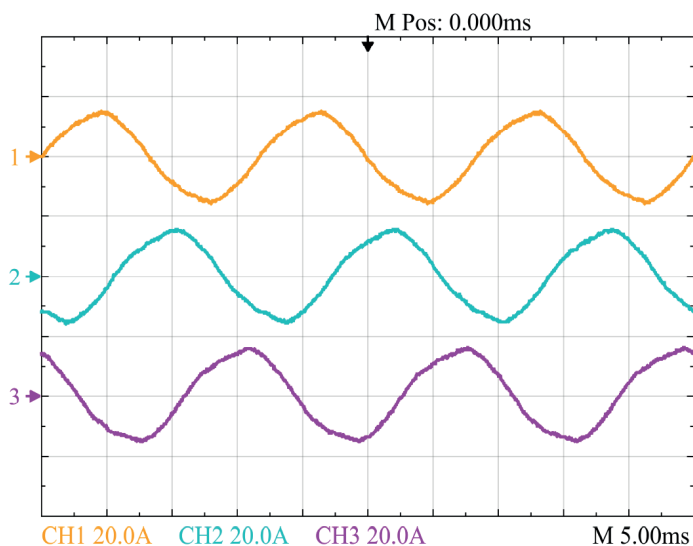
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 89 - Formas de onda experimentais da tensão no PCC com compensação para carga linear equilibrada sem restrição de energia ativa.



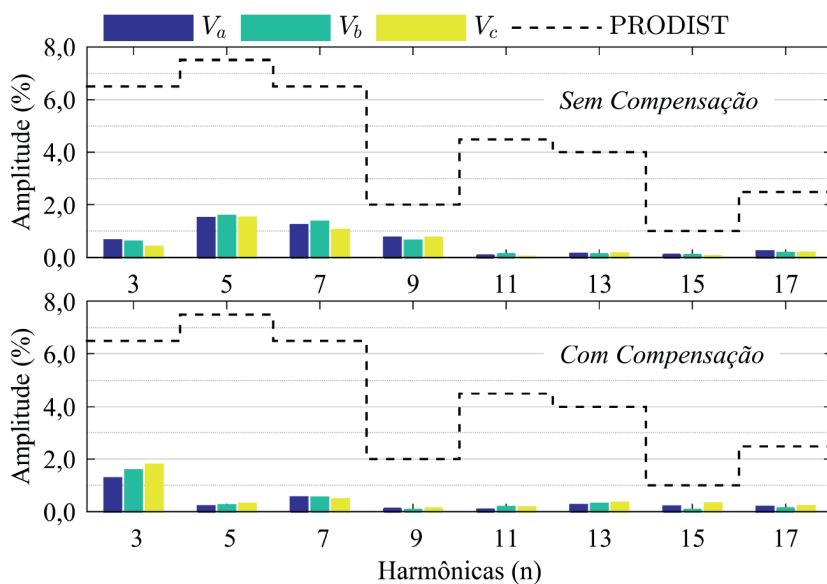
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 90 - Formas de onda experimentais das correntes injetadas pelo conversor para carga linear equilibrada com restrição de energia ativa.



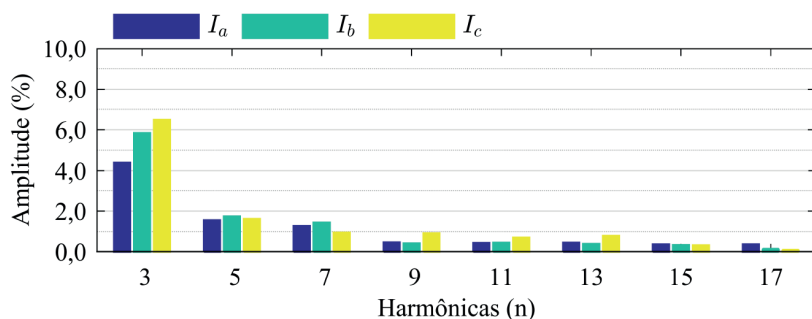
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 91 - Conteúdo harmônico experimental das tensões no PCC sem e com compensação para carga equilibrada sem restrição de energia ativa.



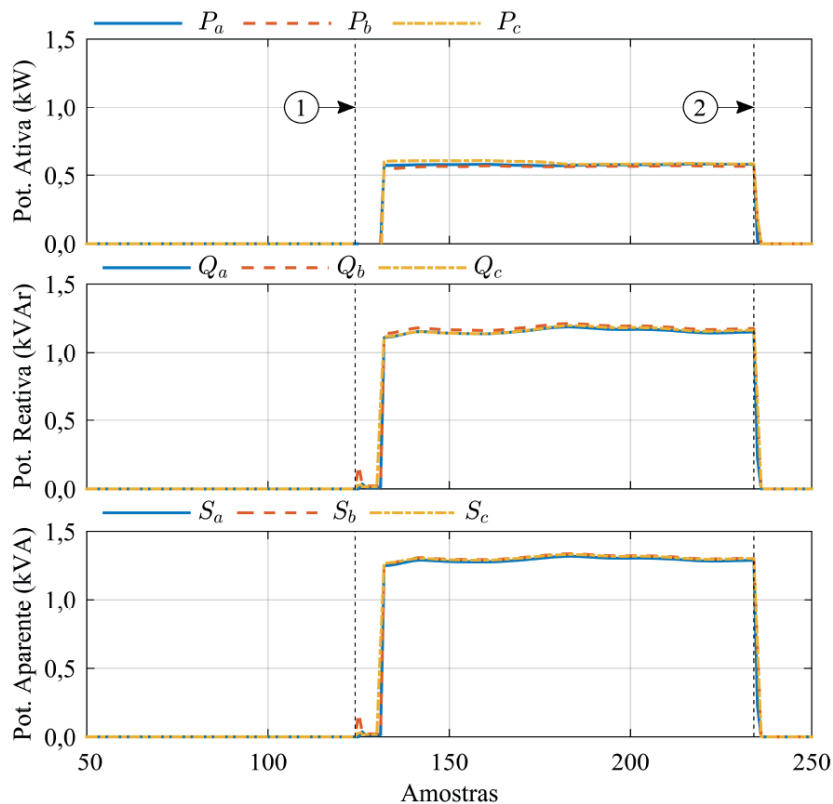
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 92 - Conteúdo harmônico experimental das correntes injetadas pelo conversor para carga linear sem restrição de energia ativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 93 - Gráficos experimentais das potências ativa, reativa e aparente para carga linear equilibrada sem restrição de energia ativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 20 - Parâmetros experimentais de tensão e corrente do sistema com carga linear equilibrada sem restrição de energia ativa.

Parâmetros	Fase	Sem Compensação	Com Compensação
Valor Eficaz da Tensão no PCC	A	106,0 V	126,8 V
	B	105,9 V	126,8 V
	C	106,0 V	128,1 V
THD_v	A	2,00 %	1,38 %
	B	2,23 %	1,64 %
	C	2,13 %	1,51 %
Valor Eficaz da Corrente do Conversor	A		10,2 A
	B	-	10,4 A
	C		10,7 A
THD_i	A		5,18 %
	B	-	6,52 %
	C		7,21 %

Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores de THD da tensão no PCC reduziram em média de 0,5 % para o conversor operando com carga linear equilibrada sem restrição de energia ativa

7.3.2 Carga Linear Desequilibrada Sem Restrição de Energia Ativa

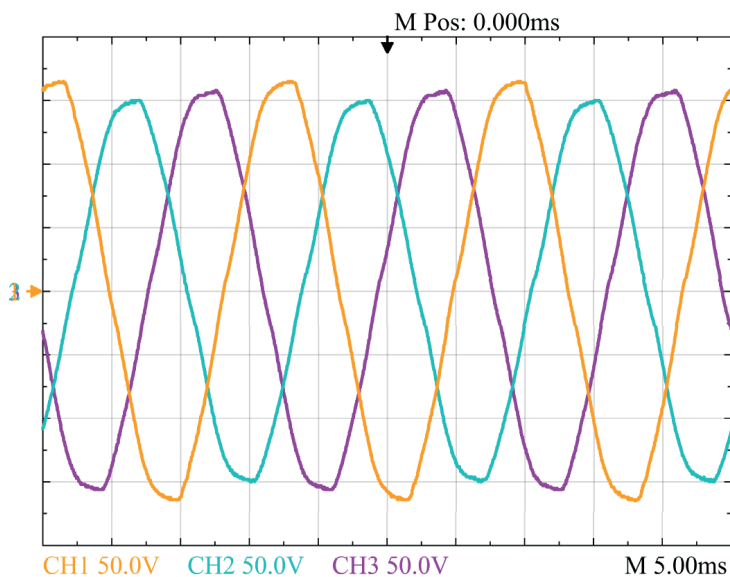
Os ensaios para carga desequilibrada foram executados sem a restrição de energia ativa. Na Figura 94 são apresentadas as formas de onda de tensão no PCC sem compensação e na Figura 95 são apresentadas as formas de onda no PCC com compensação para carga desequilibrada.

Na Figura 96 são apresentadas as formas de onda das correntes injetadas pelo conversor para carga linear equilibrada.

O conteúdo harmônico das tensões no PCC antes e depois da compensação é mostrado na Figura 97, pode-se observar que quase todas as harmônicas sofrem atenuação. Na Figura 98 é mostrado o conteúdo harmônico da corrente do conversor.

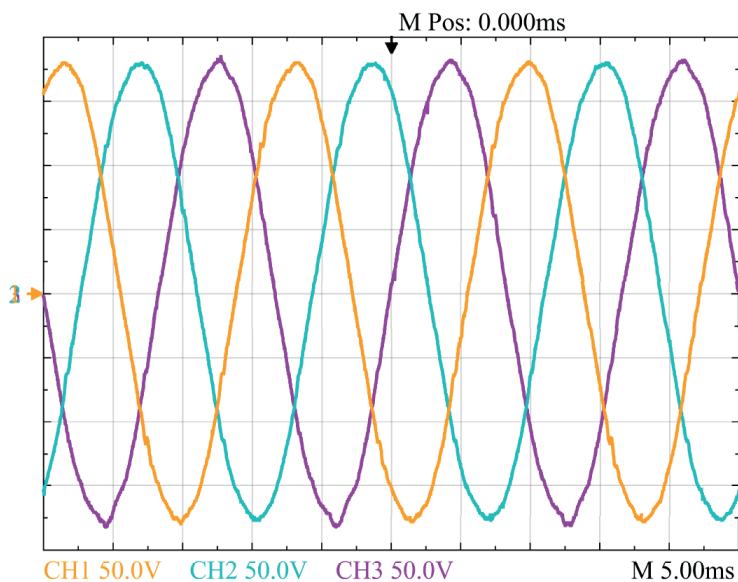
São apresentados na Figura 99 os gráficos de potência ativa, reativa e aparente do conversor. A compensação também inicia-se a partir do instante "1" e neste caso também ocorre a utilização da potência ativa e reativa, porém com diferentes valores para cada fase. Assim, independentemente da fase o valor de tensão eficaz atinge a referência estipulada de 1,00 pu (127,0 V) e no instante "2" o conversor é desligado.

Figura 94 - Formas de onda experimentais das tensões no PCC sem compensação para carga linear desequilibrada sem restrição de energia ativa.



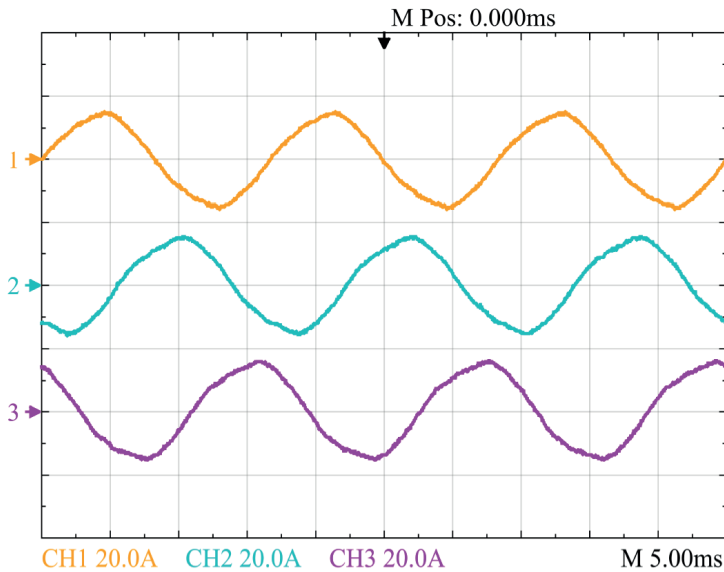
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 95 - Formas de onda experimentais das tensões no PCC com compensação para carga linear desequilibrada sem restrição de energia ativa.



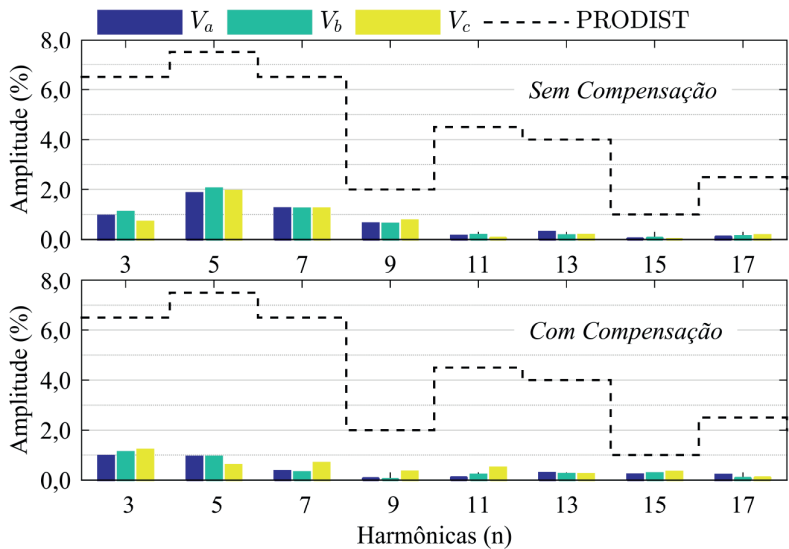
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 96 - Formas de onda experimentais das correntes injetadas pelo conversor para carga linear desequilibrada com restrição de energia ativa.



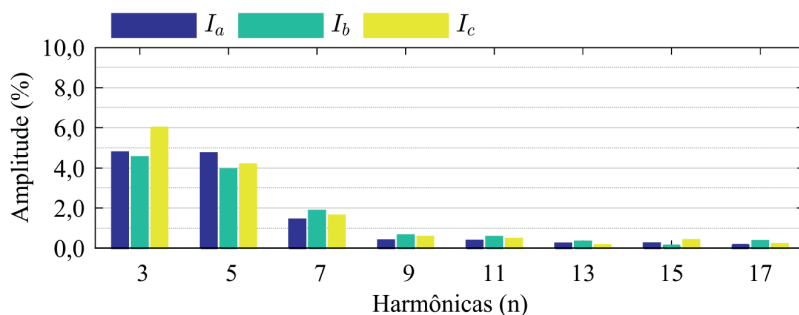
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 97 - Conteúdo harmônico experimental das tensões no PCC sem e com compensação para carga desequilibrada sem restrição de energia ativa.



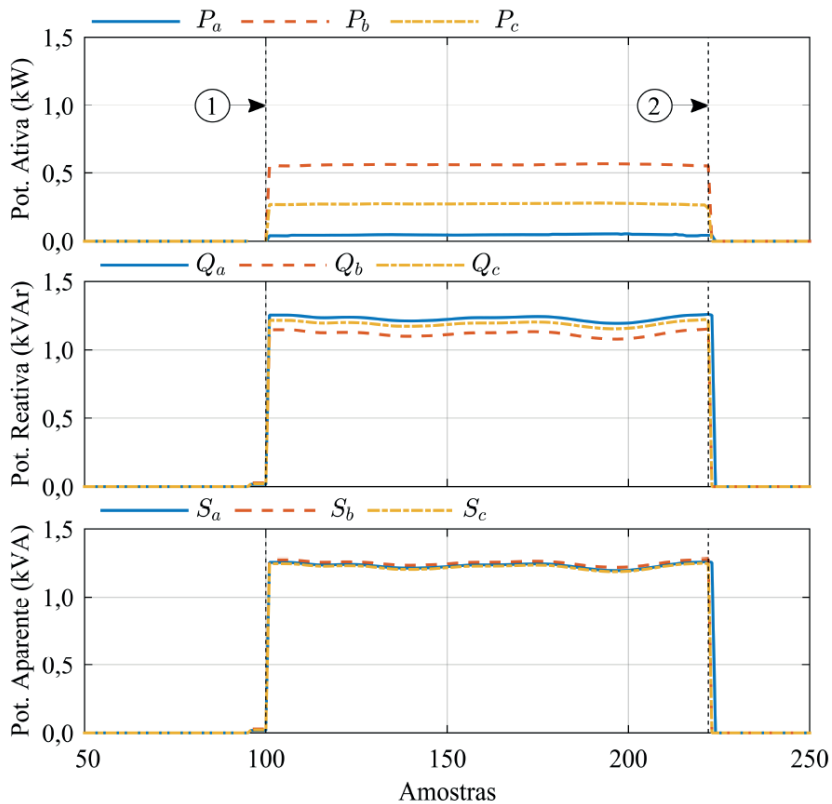
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 98 - Conteúdo harmônico experimental das correntes injetadas pelo conversor para carga desequilibrada sem restrição de energia ativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 99 - Gráficos experimentais das potências ativa, reativa e aparente para carga linear desequilibrada sem restrição de energia ativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Um resumo dos parâmetros experimentais de tensão e corrente são mostrados na Tabela 21 para o funcionamento do conversor com carga desequilibrada sem restrição de energia ativa.

Tabela 21 - Parâmetros experimentais de tensão e corrente do sistema com carga linear desequilibrada sem restrição de energia ativa.

Parâmetros	Fase	Sem Compensação	Com Compensação
Valor Eficaz da Tensão no PCC	A	117,7 V	126,6 V
	B	106,5 V	126,7 V
	C	112,2 V	127,0 V
THD_v	A	2,57 %	1,70 %
	B	2,75 %	1,73 %
	C	2,56 %	1,86 %
Valor Eficaz da Corrente do Conversor	A		9,9 A
	B	-	10,1 A
	C		10,3 A
THD_i	A		7,11 %
	B	-	6,57 %
	C		7,77 %

Fonte: Produção do próprio autor.

7.3.3 Carga Não Linear Sem Restrição de Energia Ativa

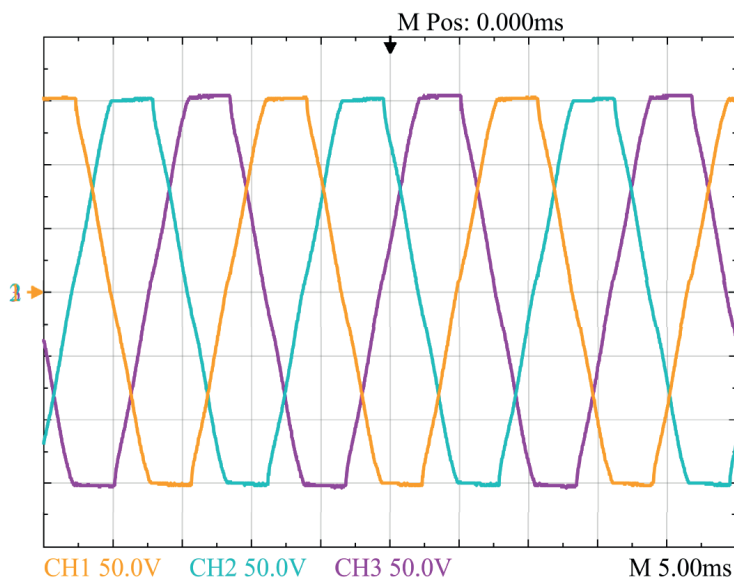
Os ensaios para carga não linear equilibrada também foram executados sem a restrição de energia ativa. Na Figura 100 são apresentadas as formas de onda de tensão no PCC sem compensação e na Figura 101 são apresentadas as formas de onda no PCC com compensação.

Na Figura 102 são apresentadas as formas de onda das correntes injetadas pelo conversor para carga não linear equilibrada e o seu conteúdo harmônico é mostrado na Figura 103.

O conteúdo harmônico das tensões no PCC antes e depois da compensação são mostradas na Figura 104, pode-se observar quase todas as harmônicas sofrem uma boa atenuação, deixando a forma de onda da tensão menos distorcida.

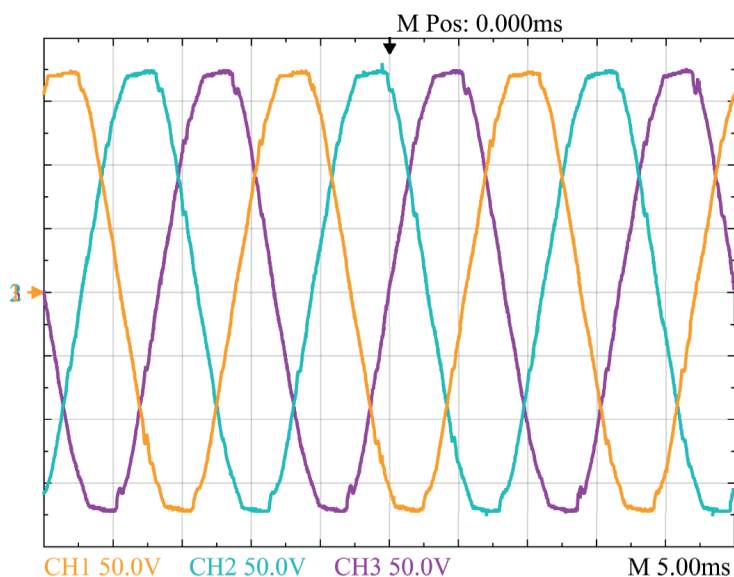
Um resumo dos parâmetros experimentais de tensão e corrente são mostrados na Tabela 22 para o funcionamento do conversor com carga não linear equilibrada sem restrição de energia ativa. Pode-se observar uma redução na THD da tensão de 2,0 % em média, para o caso das cargas não lineares.

Figura 100 - Formas de onda experimentais das tensões no PCC sem compensação para carga não linear equilibrada sem restrição de energia ativa.



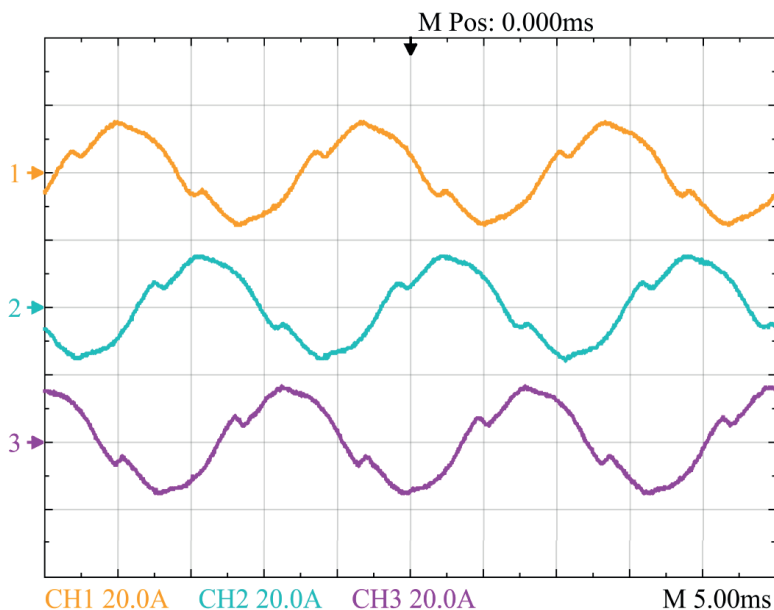
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 101 - Formas de onda experimentais das tensões no PCC com compensação para carga não linear equilibrada sem restrição de energia ativa.



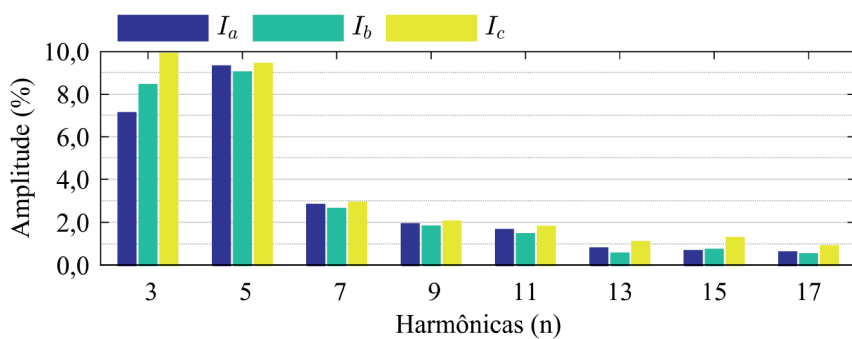
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 102 - Formas de onda das correntes injetadas pelo conversor para carga não linear equilibrada com restrição de energia ativa.



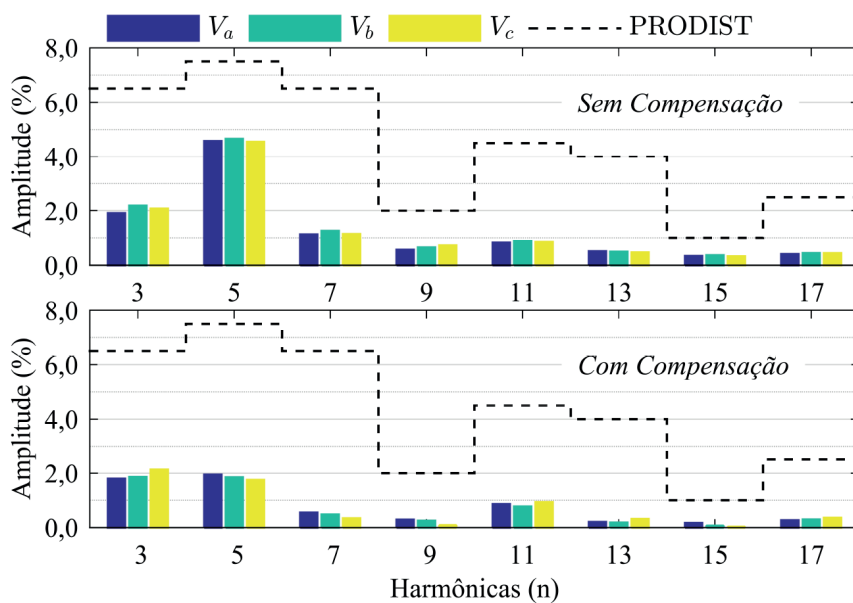
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 103 - Conteúdo harmônico experimental das correntes injetadas pelo conversor para carga linear sem restrição de energia ativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 104 - Conteúdo harmônico experimental das tensões no PCC sem e com compensação para carga não linear sem restrição de energia ativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 22 - Parâmetros experimentais de tensão e corrente do sistema com carga não linear equilibrada sem restrição de energia ativa.

Parâmetros	Fase	Sem Compensação	Com Compensação
Valor Eficaz da Tensão no PCC	A	114,5 V	126,5 V
	B	114,5 V	126,8 V
	C	115,9 V	126,7 V
THD_v	A	5,27 %	3,04 %
	B	5,50 %	3,04 %
	C	5,34 %	3,19 %
Valor Eficaz da Corrente do Conversor	A	-	10,0 A
	B	-	10,1 A
	C	-	10,5 A
THD_i	A	-	12,44 %
	B	-	13,04 %
	C	-	14,45 %

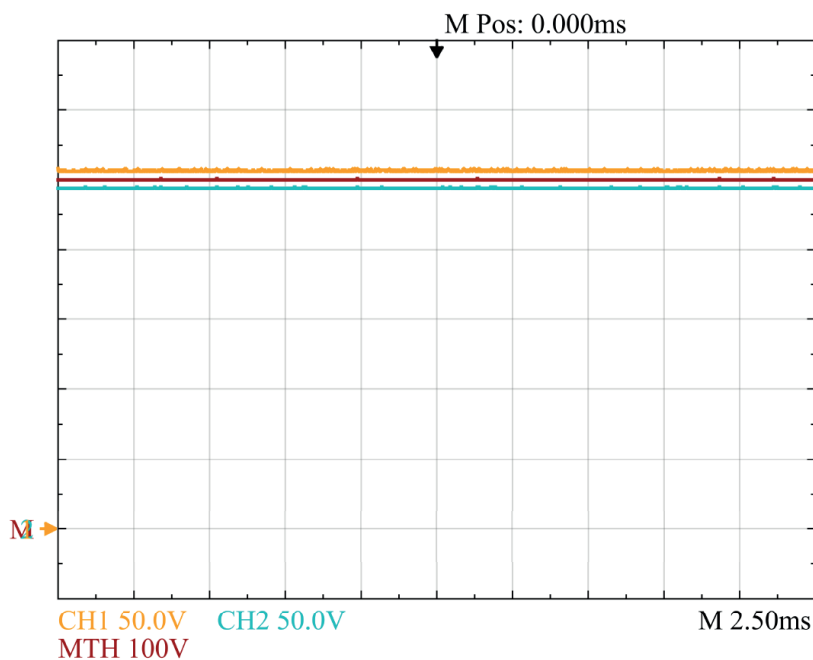
Fonte: Produção do próprio autor.

7.3.4 Tensões de Barramento

As tensões de barramento são reguladas pelo autotransformador variável, que ajusta o valor da tensão de entrada, conectado a um transformador de três enrolamentos e por um conjunto de retificadores. Durante todos os ensaios realizados o barramento foi regulado para que mantivesse o valor da tensão total de 500 V, valor utilizado no projeto e simulações do conversor.

Na Figura 105 podem ser observadas as formas de onda experimentais das tensões no barramento, sendo o valor médio de 256 V e -244 V para cada metade dos capacitores do barramento resultando em um valor médio de 500 V para o barramento total.

Figura 105 - Formas de onda experimentais das tensões no barramento regulado.



Fonte: Produção do próprio autor.

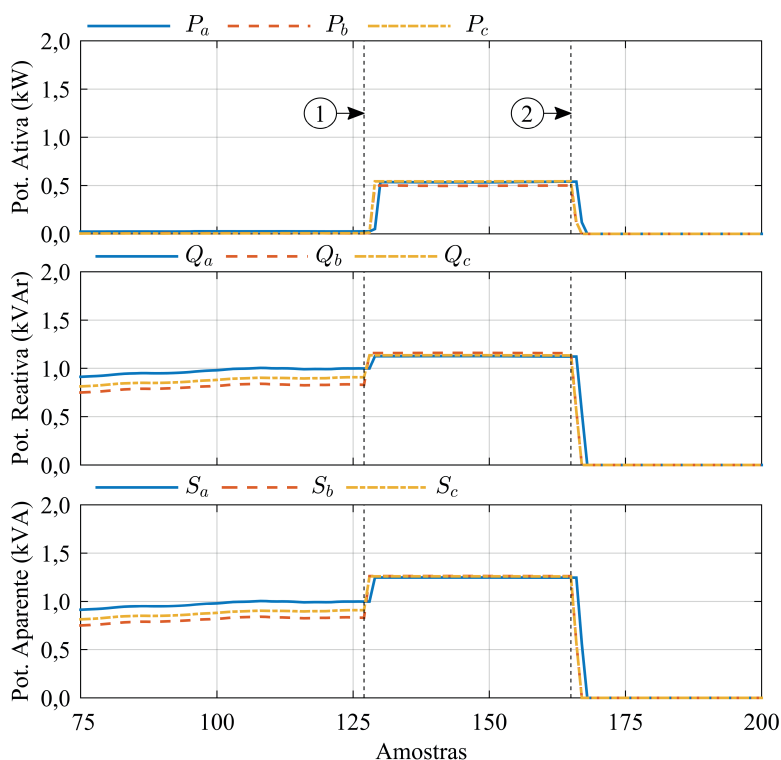
Foi utilizada a ferramenta “Matemática” (*MTH*) do osciloscópio para mostrar a soma dos valores e formas de onda da tensão de cada metade do barramento.

7.3.5 Degrau de Carga Sem Restrição de Energia Ativa

Os ensaios para degrau de carga também foram executados sem a restrição de energia ativa. São mostrados os resultados de potência do degrau de carga leve para carga pesada e o inverso também. Esses ensaios visam validar a estratégia de compensação e as malhas de controle de energia ativa e reativa.

Na Figura 106 pode-se observar as potências ativa, reativa e aparente para o degrau de carga leve para pesada. No primeiro momento, com carga leve, o conversor utiliza energia reativa para compensação, em seguida no instante "1" ocorre o degrau, onde é possível verificar a utilização de energia ativa e reativa para compensação. No instante "2" ocorre o desligamento do conversor.

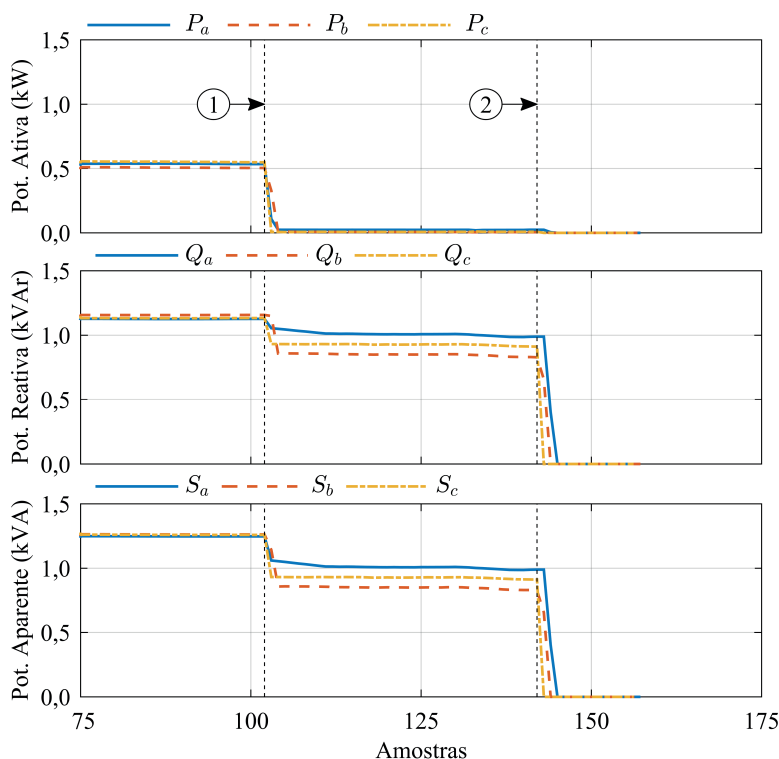
Figura 106 - Gráficos experimentais das potências ativa, reativa e aparente para degrau carga leve para pesada sem restrição de energia ativa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Agora, o ensaio é executado inversamente sendo o degrau da carga pesada para carga leve. Na Figura 107 pode-se observar as potências ativa, reativa e aparente. No primeiro momento da carga pesada o conversor utiliza energia ativa e reativa para compensação, em seguida no instante "1" ocorre o degrau, onde é possível verificar a retirada da energia ativa e somente se utiliza energia reativa para compensação. No instante "2" ocorre o desligamento do conversor.

Figura 107 - Gráficos experimentais das potências ativa, reativa e aparente para degrau carga pesada para leve sem restrição de energia ativa



Fonte: Produção do próprio autor.

7.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

São apresentados neste capítulo a implementação do protótipo em laboratório e os resultados experimentais. O circuito experimental com as devidas alterações é apresentado e discutido. As modificações da impedância da linha não prejudicaram as análises, pois são mantidas as proporções das parcelas resistivas e indutivas da linha.

A consequência imediata desta alteração foi o aumento do módulo da impedância, tornando um pior caso diante daquele utilizado em simulação.

O *DSC* utilizado na implementação do algoritmo de controle e gerenciamento mostrou-se adequado para aplicação, com ótimo desempenho das tarefas solicitadas com a atualização simples. A dupla atualização foi testada nos ensaios, porém foi identificado que o tempo de execução de todas as rotinas extrapolavam o tempo limite da interrupção, inviabilizando sua implementação. A programação em ponto flutuante facilita os esforços de cálculo permitindo a implementação dos controles digitais. O fluxograma resume o código implementado, o qual está dividido em inicialização do programa e a rotina de interrupção.

Os resultados obtidos, além de mostrarem casos semelhantes à simulação, também mostraram um caso onde a restrição de energia ativa prejudicaria a regulação de tensão eficaz no PCC. Em seguida são mostrados os resultados sem a restrição, comprovando a compensação de tensão.

Em todos os resultados experimentais observou-se uma distorção harmônica proveniente da rede elétrica do laboratório. As análises mostram que em todos os casos ocorre a redução da *THD* da tensão em até 1 % chegando próximo a 2,5 % para carga não linear. Apesar de um leve aumento na 3ª, as harmônicas de 5ª, 7ª e 9ª foram atenuadas em todos os ensaios.

Os dados de potência ativa, reativa e aparente foram coletados com o analisador de energia, mostrando que a estratégia de compensação segue as condições definidas nas etapas de projeto.



8 CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho apresenta o projeto e implementação de um conversor cc-ca trifásico a quatro fios, com controle em corrente para regulação do valor de tensão eficaz no PCC, utilizando referências de corrente em quadratura e em fase, ou seja energia reativa e ativa. Ainda de forma complementar atenua os harmônicos de tensão pela detecção da tensão no PCC. A formulação de uma estratégia de priorização da energia reativa e racionando a utilização da energia ativa é a principal contribuição trazida por este trabalho, além de adicionar funcionalidades parciais dos filtros ativos, como a atenuação de harmônicos de tensão.

A análise do fluxo de potência na rede de distribuição de baixa tensão, possibilita o equacionamento e avaliação da efetividade de se utilizar energia reativa e ativa para compensação. Os efeitos das parcelas da impedância de linha são observados em diferentes compensações de tensão eficaz no PCC. A estratégia de compensação é estudada numericamente, possibilitando validar a elevação do valor eficaz de tensão para diferentes valores de referência.

Os modelos matemáticos obtidos do conversor possibilitam que todo o sistema fosse controlado, desde as tensões de barramento até as correntes de saída no filtro. O diagrama de potência do conversor, da rede e das cargas permitem a definição e delimitação das tensões e correntes que devem ser utilizadas para o controle. O diagrama de controle apresenta as malhas de controle de forma geral, e permite a visualização das conexões entre malhas e referências.

Apesar de não ser o foco principal do conversor as especificações do projeto de potências são apresentadas. As determinações de tensão total de barramento, assim como as capacitâncias de barramento são apresentadas. O projeto do filtro LCL é um processo que envolve diversas variáveis e inúmeras abordagens sobre o tema. São apresentadas as etapas de projeto juntamente com o equacionamento base e as análises gráficas. As relações de frequência, indutância e capacitância são os pontos fundamentais para definição dos componentes do filtro. A frequência de ressonância é o ponto de maior complexidade para o projeto, devido à ordem do filtro.

O projeto dos controladores digitais utilizou a metodologia adequada para que fossem levados em conta os efeitos da discretização dos sinais. A utilização do *DSC* permite o acesso total às variáveis de controle, uma vez que são utilizadas técnicas de gerenciamento das malhas de controle. A malha de amortecimento foi a técnica escolhida para a atenuação da ressonância do filtro. A sintonia do controlador leva em conta os atrasos do processamento digital, e ainda, os ganhos não devem ter valores excessivamente altos para que não torne o controle instável. Todos esses detalhes deixam o projeto sujeito a uma avaliação de desempenho e estabilidade para o controle. A malha de corrente utiliza controladores ressonantes no objetivo de se fazer o rastreamento de referências senoidais com o menor erro possível. As demais malhas utilizam controladores do tipo PI que são suficientes para o desempenho desejado para as malhas.

As simulações numéricas de todo o sistema são executadas para verificação e comprovação das etapas anteriormente apresentadas. As condições de carga linear e não linear, equilibrada e desequilibrada, e rede distorcida são testadas. Essas cargas resumem as condições necessárias para validar o sistema completo.

Foi implementado em laboratório um protótipo de potência de 10 kVA para validação prática dos estudos. Os resultados obtidos em laboratório foram semelhantes às condições apresentadas em simulação, indicando que os modelos do sistema foram obtidos de forma adequada. Verificou-se que as tensões eficazes foram reguladas, mesmo em piores condições de impedância de linha, mostrando a flexibilidade de funcionamento do conversor. A função complementar do conversor na atenuação de harmônicas de tensão obteve reduções na ordem de 1 % da *THD* de tensão. A utilização do analisador de energia comprova o correto funcionamento das malhas de gerenciamento de energia de acordo com os resultados obtidos.

O conversor apresentou boa resposta durante os testes realizados, assim como o *DSC* desempenhou, sem maiores dificuldades, as rotinas solicitadas. Como o esperado os valores eficazes das tensões foram regulados para as referências e as harmônicas atenuadas de acordo com as especificações de projeto e condições do protótipo.

Como sugestão para trabalhos futuros, são apresentados os seguintes tópicos:

- Integração do conversor cc-ca com uma fonte de energia ativa através de um outro conversor cc-cc conectado ao barramento, podendo abranger fontes alternativas de energia ou utilizar baterias para armazenamento de energia.
- Estudar técnicas avançadas de compensação de harmônicas de tensão através da estimação a partir da tensão no PCC, como o intuito de eliminar a distorção da rede ou de cargas perturbadoras.

- I Aprofundar os estudos das técnicas de amortecimento ativo utilizando a tensão do capacitor de filtro, como avaliação da frequência de ressonância em relação à frequência de comutação e os efeitos do controle digital no desempenho da malha.
- I Investigação de outros métodos de gerenciamento e priorização de energia, como o cálculo das referências de corrente com base na estimação dos parâmetros de linha.

REFERÊNCIAS

ABOURA, F. et al. **Modeling of single-phase core type transformer**. Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on. [S.l.]: [s.n.]. Sept 2014. p. 2252-2256.

AGUIAR, L. B. D. **Um Estudo de Colapso de Tensão em Linhas de Transmissão de Energia Utilizando as Constantes Generalizadas, Gráficos Tensão X Potência E Diagramas Hiperbólicos**. UFBA. [S.l.]. 2011.

ANEEL. PRODIST - Procedimentos de Distribuição, Módulo 1 – Introdução, p. 61, 2014.

ANEEL. PRODIST - Procedimentos de Distribuição, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica., p. 76, 2014.

BAO, C. et al. Step-by-Step Controller Design for LCL-Type Grid-Connected Inverter with Capacitor x2013;Current-Feedback Active-Damping. **Power Electronics, IEEE Transactions on**, v. 29, n. 3, p. 1239-1253, March 2014. ISSN ISSN: 0885-8993 DOI: 10.1109/TPEL.2013.2262378.

BLASKO, V.; KAURA, V. A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three-phase voltage source converter. **Industry Applications, IEEE Transactions on**, v. 33, n. 2, p. 542-550, Mar 1997. ISSN ISSN: 0093-9994 DOI: 10.1109/28.568021.

BUSADA, C. A.; GOMEZ JORGE, S.; SOLSONA, J. A. Full-State Feedback Equivalent Controller for Active Damping in LCL -Filtered Grid-Connected Inverters Using a Reduced Number of Sensors. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 62, n. 10, p. 5993-6002, Oct 2015. ISSN ISSN: 0278-0046 DOI: 10.1109/TIE.2015.2424391.

BUSO, S.; MATTAVELLI, P. **Digital Control in Power Electronics**. [S.l.]: Morgan & Claypool Publishers, 2006. 151 p. ISBN ISBN: 9781598291124.

CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A. **E-313.0019 - Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição**. [S.l.]. 2014.

CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A. **E-313.0018 - Cabo de Alumínio Nu - CA e CAA**. [S.l.], p. 29. 2015.

CHANNEGOWDA, P.; JOHN, V. Filter Optimization for Grid Interactive Voltage Source Inverters. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 57, n. 12, p. 4106-4114, Dec 2010. ISSN ISSN: 0278-0046 DOI: 10.1109/TIE.2010.2042421.

DA CUNHA, J. C. **Projeto e implementação de um DSTATCOM multifuncional controlado em corrente e com mitigação de harmônicas por detecção de tensão**. Universidade do Estado de Santa Catarina. [S.l.]. 2015.

DANNEHL, J.; FUCHS, F. W.; HANSEN, S. **PWM rectifier with LCL-filter using different current control structures**. Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on. [S.l.]: [s.n.]. Sept 2007. p. 1-10.

DANNEHL, J.; LISERRE, M.; FUCHS, F. W. Filter-Based Active Damping of Voltage Source Converters With LCL Filter. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 58, n. 8, p. 3623-3633, Aug 2011. ISSN: 0278-0046 DOI: 10.1109/TIE.2010.2081952.

ENDERLE, T. P. et al. **D-STATCOM applied to single-phase distribution networks: Modeling and control**. IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.]: [s.n.]. Oct 2012. p. 321-326.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of Power Electronics**. [S.l.]: Springer US, 2001. 883 p. ISBN: 9780792372707 LCCN: 00052569.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power system analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994. ISBN: 9780070612938 LCCN: lc93039219.

HE, J.; LI, Y. W.; MUNIR, M. S. A Flexible Harmonic Control Approach Through Voltage-Controlled DG-Grid Interfacing Converters. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 59, n. 1, p. 444-455, Jan 2012. ISSN: 0278-0046 DOI: 10.1109/TIE.2011.2141098.

HOCK, R. T. **Regulador de tensão móvel controlado em tensão com rastreamento do ponto de mínima potência aparente**. Universidade do Estado de Santa Catarina. [S.l.]. 2015.

JAYAPRAKASH, P.; SINGH, B.; KOTHARI, D. P. **DSP based implementation of a three-phase four-wire DSTATCOM for voltage regulation and power quality improvement**. Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE. [S.l.]: [s.n.]. Nov 2009. p. 3660-3665.

KANIEWSKI, J. et al. Hybrid Voltage Sag/Swell Compensators: A Review of Hybrid AC/AC Converters. **Industrial Electronics Magazine, IEEE**, v. 9, n. 4, p. 37-48, Dec 2015. ISSN: 1932-4529 DOI: 10.1109/MIE.2015.2404350.

KLEIN, R. L. **Carga Eletrônica CA Programável com Regeneração de Energia**. UDESC. [S.l.]. 2012.

KOURO, S. et al. Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology. **Industrial Electronics Magazine, IEEE**, v. 9, n. 1, p. 47-61, March 2015. ISSN ISSN: 1932-4529 DOI: 10.1109/MIE.2014.2376976.

KUMAR, C.; MISHRA, M. K. A Voltage-Controlled DSTATCOM for Power-Quality Improvement. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 29, n. 3, p. 1499-1507, June 2014.

KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. **Power system stability and control**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994. 1176 p.

LI, Y. W.; HE, J. Distribution System Harmonic Compensation Methods: An Overview of DG-Interfacing Inverters. **Industrial Electronics Magazine, IEEE**, v. 8, n. 4, p. 18-31, Dec 2014. ISSN ISSN: 1932-4529 DOI: 10.1109/MIE.2013.2295421.

LISERRE, M.; DELL'AQUILA, A.; BLAABJERG, F. **Stability improvements of an LCL-filter based three-phase active rectifier**. Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual. [S.l.]: [s.n.]. 2002. p. 1195-1201 vol.3.

LISERRE, M.; F., B.; A., D. Step-by-step design procedure for a grid-connected three-phase PWM voltage source converter. **International Journal of Electronics**, v. 91, n. 8, p. 445-460, 2004.

MALINOWSKI, M.; KAZMIERKOWSKI, M. P.; BERNET, S. **New simple active damping of resonance in three-phase PWM converter with LCL filter**. Industrial Technology, 2005. ICIT 2005. IEEE International Conference on. [S.l.]: [s.n.]. Dec 2005. p. 861-865.

MISHRA, M. K.; GHOSH, A.; JOSHI, A. Operation of a DSTATCOM in voltage control mode. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 18, n. 1, p. 258-264, Jan 2003.

MOHAMED, Y. A.-R. I.; A-RAHMAN, M.; SEETHAPATHY, R. Robust Line-Voltage Sensorless Control and Synchronization of LCL -Filtered Distributed Generation Inverters for High Power Quality Grid Connection. **Power Electronics, IEEE Transactions on**, v. 27, n. 1, p. 87-98, Jan 2012. ISSN ISSN: 0885-8993 DOI: 10.1109/TPEL.2011.2159866.

NISHIOKA, J. K. **Sistema de Controle Digital para Retificador Trifásico a Quatro Fios com Filtro LCL**. UDESC. [S.l.]. 2011.

OGATA, K. **Discrete-time Control Systems**. [S.l.]: Prentice Hall, 1995. ISBN ISBN: 9780130342812 LCCN: 94019896.

ORTMANN, M. S. **Filtro Ativo Trifásico com Controle Vetorial Utilizando DSP: Projeto e Implementação**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis. 2008.

OURY, A.; BERGERON, R.; LAPERRIERE, A. **Source impedances of the Canadian distribution systems (residential and industrial)**. Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. 14th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ. No. 438). [S.l.]: [s.n.]. June 1997. p. 34/1-34/8 vol.2.

PENA-ALZOLA, R. et al. LCL-Filter Design for Robust Active Damping in Grid-Connected Converters. **Industrial Informatics, IEEE Transactions on**, v. 10, n. 4, p. 2192-2203, Nov 2014. ISSN ISSN: 1551-3203 DOI: 10.1109/TII.2014.2361604.

PENA-ALZOLA, R. et al. Systematic Design of the Lead-Lag Network Method for Active Damping in LCL-Filter Based Three Phase Converters. **Industrial Informatics, IEEE Transactions on**, v. 10, n. 1, p. 43-52, Feb 2014. ISSN ISSN: 1551-3203 DOI: 10.1109/TII.2013.2263506.

PRODANOVIC, M.; GREEN, T. C. Control and filter design of three-phase inverters for high power quality grid connection. **Power Electronics, IEEE Transactions on**, v. 18, n. 1, p. 373-380, Jan 2003. ISSN ISSN: 0885-8993 DOI: 10.1109/TPEL.2002.807166.

RAHIMI-EICHI, H. et al. Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles. **Industrial Electronics Magazine, IEEE**, v. 7, n. 2, p. 4-16, June 2013. ISSN ISSN: 1932-4529 DOI: 10.1109/MIE.2013.2250351.

SEMIKRON. **Datasheet Semikron SKM75GB063D**, jun. 2007. Disponível em: <<http://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skm-75gb063d-22890050>>. Acesso em: dez. 2015.

SIMÕES, C. A.; SILVEIRA, E. S. A. **Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência**. [S.l.]: UFSC, 2002. Notas de Aula.

TANG, Y. et al. Generalized Design of High Performance Shunt Active Power Filter With Output LCL Filter. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 59, n. 3, p. 1443-1452, March 2012. ISSN ISSN: 0278-0046 DOI: 10.1109/TIE.2011.2167117.

VANDOORN, T. L. et al. Microgrids: Hierarchical Control and an Overview of the Control and Reserve Management Strategies. **Industrial Electronics Magazine, IEEE**, v. 7, n. 4, p. 42-55, Dec 2013. ISSN ISSN: 1932-4529 DOI: 10.1109/MIE.2013.2279306.

WANG, X.; BLAABJERG, F.; LOH, P. C. **Design-oriented analysis of resonance damping and harmonic compensation for LCL-filtered voltage source converters**. Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014 International. [S.l.]: [s.n.]. May 2014. p. 216-223.

WU, E.; LEHN, P. W. Digital Current Control of a Voltage Source Converter With Active Damping of LCL Resonance. **Power Electronics, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 5, p. 1364-1373, Sept 2006. ISSN ISSN: 0885-8993 DOI: 10.1109/TPEL.2006.880271.

XU, Y.; LI, F. Adaptive PI Control of STATCOM for Voltage Regulation. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 29, n. 3, p. 1002-1011, June 2014. ISSN ISSN: 0885-8977 DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2291576.

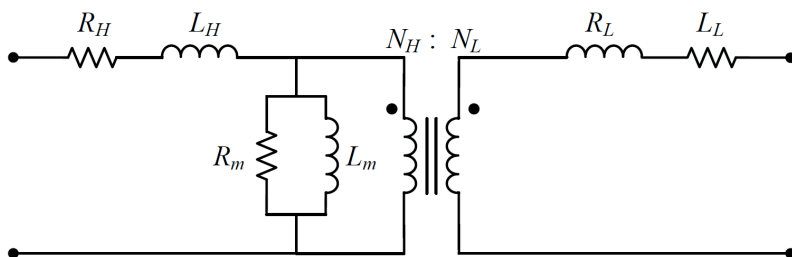
YANG, D.; RUAN, X.; WU, H. Impedance Shaping of the Grid-Connected Inverter with LCL Filter to Improve Its Adaptability to the Weak Grid Condition. **Power Electronics, IEEE Transactions on**, v. 29, n. 11, p. 5795-5805, Nov 2014. ISSN ISSN: 0885-8993 DOI: 10.1109/TPEL.2014.2300235.

YU, X. et al. The New Frontier of Smart Grids. **Industrial Electronics Magazine, IEEE**, v. 5, n. 3, p. 49-63, Sept 2011. ISSN ISSN: 1932-4529 DOI: 10.1109/MIE.2011.942176.

APÊNDICE A - PARÂMETROS DE LINHA

Os cálculos dos parâmetros de linha envolvem os parâmetros do transformador e dos cabos de distribuição. Para os cálculos dos parâmetros do transformador é utilizado o circuito equivalente do tipo T, mostrado na Figura 108. Este modelo é utilizado para descrever o comportamento do transformador, onde R_H e R_L são resistências série que representam as perdas. Os termos L_H e L_L representam as indutâncias de dispersão de cada enrolamento. Os termos do ramo de magnetização, R_m e L_m representam alguns comportamentos do núcleo como saturação, histerese, os efeitos da corrente de Foucault e ainda incluir efeitos não lineares (GRAINGER; STEVENSON, 1994), (ABOURA *et al.*, 2014).

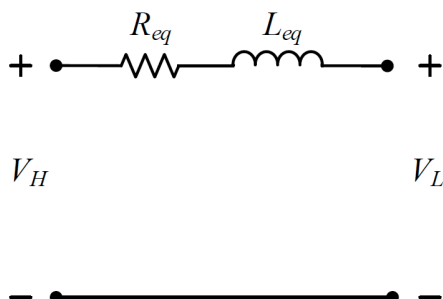
Figura 108 - Circuito equivalente do tipo T para o transformador de dois enrolamentos.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para analisar o circuito é interessante que o modelo tenha apenas uma tensão de referência, levando o circuito equivalente a ser representado com as impedâncias refletidas para o lado primário ou secundário. Ainda, o ramo de magnetização pode ser desprezado devido aos baixos efeitos das tensões e correntes. Levando assim ao circuito simplificado da Figura 109, onde somente uma impedância série Z_{eq} representado o transformador.

Figura 109 - Circuito equivalente simplificado referido para o lado secundário.



Fonte: Produção do próprio autor.

Esta simplificação leva a representação da impedância como a queda percentual da tensão no transformador para corrente nominal. Sendo assim, é possível determinar todos os parâmetros apresentados no modelo da Figura 109 através dos ensaios de curto-circuito e de circuito aberto.

Utilizando os dados da Tabela 23 pode-se calcular os parâmetros do transformador utilizado.

Tabela 23 - Dados do transformador

Descrição	Símbolo	Valores
Potência do Transformador	S_{tr}	30 kVA
Tensão de Linha	V_L	380 V
Frequência Nominal	f	60 Hz
Impedância Percentual	$Z_{\%}$	3,5%
Perdas Totais	P_{totais}	695 W
Perdas no Ferro	P_{ferro}	150W

Fonte: Baseado em (CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A., 2014).

A corrente nominal de fase é calculada a partir da potência e da tensão nominal do transformador, conforme eq. (60):

$$I_n = \frac{P_{tr}}{\sqrt{3} \cdot V_L} = \frac{30k}{\sqrt{3} \cdot 380} = 45,58A \quad (60)$$

A impedância base do transformador é calculada conforme eq. (61):

$$Z_{base_{tr}} = \frac{V_L^2}{P_{tr}} = 4,813\Omega \quad (61)$$

A impedância percentual do enrolamento referido é obtida através da eq. (62):

$$Z_{eq} = Z_{\%} \cdot Z_{base_{tr}} = 3,5\% \cdot 4,813 = 0,168\Omega \quad (62)$$

As perdas no cobre são calculadas pela diferença entre as perdas totais e as perdas no ferro, conforme eq. (63):

$$P_{cobre} = P_{totais} - P_{ferro} = 695 - 150 = 545W \quad (63)$$

A resistência do enrolamento referido é obtida a partir das perdas no cobre e da corrente nominal, de acordo com a eq. (64):

$$R_{eq} = \frac{P_{cobre}}{I_n^2} = \frac{545}{45,58^2} = 0,087442\Omega \quad (64)$$

Assim pode-se obter a reatância do enrolamento, utilizando a impedância e a resistência do enrolamento, conforme eq. (65):

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{0,168^2 - 0,0874^2} = 0,144\Omega \quad (65)$$

A relação entre as parcelas resistivas e indutivas do enrolamento é mostrada na eq. (66):

$$\frac{R_{eq}}{X_{eq}} = 0,607 ; |Z_{eq}| = 0,168 \quad (66)$$

As bases utilizadas são mostradas na eq. (67):

$$S_{base} = 10kVA ; V_{base} = 220V ; Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = 4,84\Omega \quad (67)$$

Os valores em pu dos parâmetros do transformador:

$$\frac{Z_{eq}}{Z_{base}} = 0,0348pu ; \frac{X_{eq}}{Z_{base}} = 0,0297pu ; \frac{R_{eq}}{Z_{base}} = 0,0181pu \quad (68)$$

A impedância do trecho é calculada utilizando os parâmetros distribuídos do cabo e da distância até o ponto de conexão de cargas, conforme eq. (69):

$$Z_c = Z_{cabos} \cdot d = (1,7159 + j \cdot 0,4495) \cdot 0,4 = 0,6864 + j \cdot 0,1798 \quad (69)$$

Os valores em pu dos parâmetros do cabo:


$$\frac{Z_c}{Z_{base}} = (0,1419 + j \cdot 0,0371)pu \quad (70)$$

A impedância resultante é a soma das impedâncias do transformador e do cabo, conforme eq. (71):

$$\begin{aligned} Z_l &= Z_{tr} + Z_c \\ Z_l &= (0,0181 + j \cdot 0,0298) + (0,1420 + j \cdot 0,0371) \\ &= (0,1600 + j \cdot 0,0669)pu \end{aligned} \quad (71)$$

Utilizando a representação polar chega-se a impedância conforme eq. (72)


$$Z_l = 0,1735 \angle 22,69^\circ \quad (72)$$




SISTEMA DE CONTROLE DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA PARA A REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 




SISTEMA DE CONTROLE DE POTÊNCIA

ATIVA E REATIVA PARA A REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 